**Universidade do Estado do Pará**
**Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação**
**Centro de Ciências Naturais e Tecnologia**
**Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia**
**PPGTEC – Mestrado**

Mônica Couto de Araújo

# Avaliação e Comparação da Eficiência de Diferentes Meios Filtrantes na Remoção de Ferro em Águas Subterrâneas no Município de Altamira-PA

Belém
2025

Mônica Couto de Araújo

# Avaliação e Comparação da Eficiência de Diferentes Meios Filtrantes na Remoção de Ferro em Águas Subterrâneas no Município de Altamira-PA

Projeto de Dissertação apresentada para a qualificação como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará, na linha de pesquisa em Desenvolvimento Sustentável.
Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a) Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez

Belém
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP),
Biblioteca do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém - PA.

A663a Araújo, Mônica Couto de

Avaliação e comparação da eficiência de diferentes meios filtrantes na remoção de ferro em águas subterrâneas no município de Altamira-PA. / Mônica Couto de Araújo; Orientadora Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez. -- Belém, 2026.
87 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém, 2026.

1. Água - Filtração - Altamira (PA). 2. Água - Purificação - Altamira (PA). 3. Águas subterrâneas - Oxidação - Filtração. 4. Água potável - Tratamento. I. Gutierrez, Lucy Anne Cardoso Lobão. II. Título.

**CDD 628.1683**

Mônica Couto de Araújo

# Avaliação e Comparação da Eficiência de Diferentes Meios Filtrantes na Remoção de Ferro em Águas Subterrâneas no Município de Altamira-PA

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará.

Data da aprovação:

Banca Examinadora

_____ – Orientador(a)
Prof.(a) Dr.(a) Lucy Anne Cardoso Lobão Gutierrez
Doutora em Geologia e Geoquímica
Universidade do Estado do Pará

_____ – 1º Examinador(a)
Prof.(a) Dr.(a) Elzelis Muller da Silva
Doutora em Engenharia dos Recursos Naturais da Amazônia
Universidade do Estado do Pará

_____ – 2º Examinador(a)
Prof.(a) Dr.(a) Ana Julia Soares da Silva Barbosa
Doutora em Engenharia dos Recursos Naturais da Amazônia
Universidade do Estado do Pará

_____ – 3º Examinador(a)
Prof.(a) Dr.(a) Jaqueline Maria Soares
Doutora em Ciências Ambientais
Instituto Federal do Pará

# DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista à minha mãe, Márcia Couto de Araújo, cujo esforço, dedicação e incentivo foram fundamentais ao longo da minha jornada; ao meu pai, Lúcio Nunes de Araújo que assim como minha mãe, sempre esteve ao meu lado me apoiando e vibrando pelas minhas conquistas, a minha avó, Zeni da Silva Couto, que é nossa base e que tanto me ajuda; e aos meus irmãos Lucas, Shirley e Marcelo, pelo companheirismo e por toda energia positiva. Amo vocês. Dedico também, com carinho e saudade, à memória da minha querida tia Rosiley Couto, que sempre nos incentivou e que, mesmo ausente, continua fazendo diferença em minha vida.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos, por guiar meus passos e por ser meu escudo protetor. Que toda honra e glória seja dada a Deus.

Aos meus pais, que nunca deixaram de me apoiar em cada caminho que decidi trilhar, agradeço por todo o esforço e dedicação ao meu futuro. Aos meus irmãos e a todos os meus familiares, que sempre torceram por mim, em especial, agradeço à minha avó, que não mediu esforços para me ajudar a permanecer em Belém durante essa jornada.

Agradeço às minhas colegas de turma e de apartamento, Heloisa e Tayane, pelo companheirismo durante minha estadia em Belém. Meus agradecimentos especiais aos colegas Reimison e Gabriela, cujo apoio inicial foi fundamental para a concretização do mestrado. Também sou grata à amiga Beatriz Silveira, pelo apoio e incentivo na fase final da dissertação.

Agradeço sinceramente a todos os envolvidos na execução deste projeto. Em especial, ao Tiago Freitas, pelo apoio essencial na montagem e instalação do filtro piloto no km 23; à Lorena Araújo, que esteve comigo no início dessa jornada, pela dedicação e companheirismo nos desafios enfrentados; ao seu Cuti, morador da vila 7,5, por ser meu ponto de apoio nas coletas de água; e a todos do portinho da vila, pelo acolhimento durante as longas jornadas de campo. Ao Rafael Oliveira, pela coorientação (TCC), e a toda a equipe da COSALT, pelo suporte tanto em campo quanto no laboratório, que tornaram possível o desenvolvimento dessa dissertação.

Agradeço ainda à equipe da ETA do bairro Buriti onde foi desenvolvida a dissertação – especialmente ao Laerte, Mário e Ludimila – pelo apoio constante na montagem instalação e adaptação do sistema.

À banca, Profª Drª Ana Júlia e Elzelis Muller, minha gratidão por cada contribuição que enriqueceu este trabalho. Ao PPGTEC e a todos os professores envolvidos, agradeço pelos valiosos ensinamentos ao longo da jornada. Agradeço também à minha supervisora de estágio docência Juliane Cavalcante, pela orientação.

A FAPESPA pelo auxílio concedido, que foi fundamental para o suporte e a permanência no mestrado.

E, principalmente, à minha orientadora Lucy Anne Gutierrez, pela orientação, pelos ensinamentos e, sobretudo, pela paciência e compreensão ao longo de todo o processo. Sou grata por sua parceria desde a graduação neste projeto.

# EPÍGRAFE

“...tudo o que vocês pedirem em oração, acreditem que já o receberam, e assim será”

**(Marcos 11:24)**

**RESUMO**

O fornecimento de água tratada é essencial à saúde pública e ao desenvolvimento urbano. Esta pesquisa avaliou a eficiência de diferentes meios filtrantes - areia, antracito e zeólita - na remoção de cor, turbidez e ferro de águas subterrâneas, por meio de filtração simples e oxidação seguida de filtração (esta última aplicada quando a filtração simples não foi suficiente para remoção do ferro). Foram conduzidas três carreiras de filtração (6 a 10 horas) para cada meio filtrante, exceto para a combinação oxidação seguida de filtração com areia, que teve quatro carreiras. As amostras foram coletadas após 30 minutos do início e a cada 2 horas. Na filtração simples com areia, as eficiências variaram de 82,41% a 85,96% (turbidez), 20,23% a 56,56% (cor) e 0% a 92,2% (ferro). Com oxidação prévia, os resultados melhoraram para 82,71% a 91,25% (turbidez), 18,12% a 92,07% (cor) e 0% a 100% (ferro). O antracito apresentou melhor desempenho, com remoções de 89,46% a 95,58% (turbidez), 66,87% a 78,89% (cor) e 100% (ferro). A zeólita obteve os melhores resultados, com remoções de 99,53% a 100% (turbidez), 92,65% a 96,56% (cor) e 100% (ferro). Portanto, conclui-se que a zeólita demonstrou a maior eficiência na remoção da cor, turbidez e ferro, atendendo integralmente aos limites da Portaria nº 888/2021. No entanto, reforça-se a necessidade de novas pesquisas para aprimorar os métodos de tratamento e assegurar o direito universal ao acesso à água potável.
**Palavras chave**: Oxidação, Filtração Simples, Zeólita, Tratamento de Água, Remoção de Ferro.

**ABSTRACT**

The supply of treated water is essential to public health and urban development. This research evaluated the efficiency of different filter media sand, anthracite, and zeolite - in removing color, turbidity, and iron from groundwater through simple filtration and oxidation followed by filtration (the latter applied when simple filtration was not sufficient to remove iron). Three filtration runs (6 to 10 hours) were conducted for each filter medium, except for the combination of oxidation followed by filtration with sand, which had four runs. Samples were collected 30 minutes after the start and every 2 hours. In simple filtration with sand, efficiencies ranged from 82.41% to 85.96% (turbidity), 20.23% to 56.56% (color), and 0% to 92.2% (iron). With prior oxidation, the results improved to 82.71% to 91.25% (turbidity), 18.12% to 92.07% (color), and 0% to 100% (iron). Anthracite performed best, with removals of 89.46% to 95.58% (turbidity), 66.87% to 78.89% (color), and 100% (iron). Zeolite obtained the best results, with removals of 99.53% to 100% (turbidity), 92.65% to 96.56% (color), and 100% (iron). Therefore, it can be concluded that zeolite demonstrated the highest efficiency in removing color, turbidity, and iron, fully complying with the limits of Ordinance No. 888/2021. However, further research is needed to improve treatment methods and ensure the universal right to access to drinking water.
**Keywords:** Oxidation, Simple Filtration, Zeolite, Water Treatment, Iron Removal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo ..... 22
Figura 2: Perfil construtivo do poço tubular e constituição geológica ..... 23
Figura 3: Fluxograma das etapas da pesquisa..... 24
Figura 4: Desenho esquemático do filtro piloto e sistema piloto completo..... 25
Figura 5: Perda de carga nas carreiras de filtração dos meios filtrantes: Areia, Antracito e Zeólita..... 29
Figura 6: Perda de carga acima do material filtrante ..... 31
Figura 7: Retrolavagem do filtro no final e no início das carreiras de filtração ..... 32
Figura 8, 9 e 10: Análises do teor de ferro na água bruta ..... 32
Figura 11: Resultados da filtração simples com areia na remoção de cor e turbidez ..... 36
Figura 12: Resultados da simples com areia na remoção de ferro..... 37
Figura 13: Resultados da dosagem de cloro no processo de oxidação seguida de Filtração39
Figura 14: Resultados da oxidação seguida de filtração com areia na remoção de cor e turbidez..... 42
Figura 15: Resultados da oxidação seguida de filtração, com Areia na remoção de ferro.... 43
Figura 16: Resultados da filtração simples com antracito, na remoção de cor e turbidez..... 46
Figura 17: Resultados da filtração simples com zeólita na remoção de cor e turbidez..... 49

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1**: Parâmetros físico-químicos e métodos utilizados ..... 28
**Tabela 2:** Valores de ferro encontrados em amostras de água bruta ..... 32
**Tabela 3:** Resultados da filtração simples com areia. ..... 34
**Tabela 4:** Eficiência da filtração simples com areia. ..... 34
**Tabela 5:** Resultados da Oxidação seguida de filtração, utilizando Meio Filtrante de Areia. 40
**Tabela 6:** Resultados da Oxidação seguida de filtração, utilizando Meio Filtrante de Areia. 41
**Tabela 7:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Antracito. ..... 44
**Tabela 8:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Antracito. ..... 44
**Tabela 9:** Resultados da filtração simples com zeólita. ..... 47
**Tabela 10:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Zeólita. ..... 48
**Tabela 11:** Resultados da da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes. ..... 51

**SUMÁRIO**

1. INTRODUÇÃO ..... 12
2. OBJETIVOS ..... 13
2.1 Objetivo Geral ..... 13
2.2 Específicos ..... 14
3. REVISÃO DA LITERATURA ..... 14
3.1 Água Potável, Saúde Pública e Saneamento Básico ..... 14
3.2 Presença de Ferro na Água e seus Inconvenientes ..... 16
3.3 Remoção do Ferro da Água ..... 18
3.4 Areia, Antracito e Zeólita como meios Filtrantes ..... 19
4. MATERIAS E MÉTODOS ..... 20
4.1 Área de Estudo ..... 21
4.2 Sistema de Tratamento de Água ..... 23
4.3 Descrição do sistema ..... 24
4.4 Definição dos parâmetros operacionais ..... 25
4.4.1. Taxa de Filtração ..... 25
4.4.2 Perda de Carga e Carreira de Filtração ..... 26
4.4.3. Retrolavagem ..... 27
4.5 Avaliação da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes ..... 27
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 28
5.1 Taxa de filtração ..... 28
5.2 Perda de Carga e Carreira de Filtração ..... 29
5.3 Retrolavagem ..... 31
5.4 Avaliação da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes ..... 32
5.4.1 Análise da Água Bruta ..... 32
5.4.2 Eficiência da Filtração Simples com Areia ..... 33
5.4.3 Eficiência da Oxidação seguida da Filtração com Areia ..... 37
5.4.4 Eficiência da Filtração Simples com Antracito ..... 43
5.4.4 Eficiência da Filtração Simples com Zeólita ..... 46
5.4.5 Análise da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes ..... 50
6. CONCLUSÃO ..... 52
REFERÊNCIAS ..... 55
APÊNDICE - ARTIGO SUBMETIDO ..... 62

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso indispensável para a manutenção da vida na Terra, uma vez que está diretamente relacionada aos aspectos que possibilitam a conservação dos serviços ambientais e ecossistêmicos, sobretudo a regulação do clima (Von Sperling, 2011; Yan *et al*. 2024).

Nessa perspectiva o acesso a água potável para o abastecimento público, de acordo com Cid-escobar *et al.* (2024) e García-Ávila *et al*, (2024) são aspectos, nos quais convergem, inclusive, com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Organizações das Nações Unidas (ONU), especialmente o ODS 6, no qual tem como objetivo assegurar o acesso à água segura e saneamento para todos.

Logo, o tratamento e distribuição de água destinada para o consumo humano, está continuadamente associado com a saúde pública e ao desenvolvimento das cidades, além de serem requisitos prioritários do saneamento básico, visto que toda atividade humana depende do seu uso (Chaysiri; Chinviriyasit; Louis 2024; Viegas *et al*., 2024).

Entretanto, o uso inadequado e inconsciente da água representa uma ameaça à sua qualidade e quantidade (Soares *et al*., 2021; Chaves *et al*., 2022), principalmente, devido ter à natureza de solvente universal, com isso, cada vez mais, esse recurso esta sujeito à poluição e contaminação, não só pelas às ações antrópicas, mais frequentes em águas superficiais, mas também pelas próprias formações e características dos solos e das rochas, a qual atingem, especialmente as águas subterrâneas, pela presença elevada de ferro dissolvido, em que geralmente estão associados ao manganês, o que exige maiores investimentos para torná-la potável (Almeida *et al.*, 2020; Hossain *et al*, 2023).

Nesse sentido a qualidade da água é regida por normas regulamentadoras que estabelecem critérios de potabilidade, abrangendo suas características organolépticas, físico-químicas e bacteriológicas. Fatores esses que consequentemente determinam o seu nível de tratamento (Brasil, 2017; Gouvea; Ferreira, 2019; Michelan *et al.*, 2019; Castro-Jiménez *et al.,* 2022).

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde nº 888 de 4 de maio de 2021 regulamenta os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. De acordo com a portaria, o valor máximo permitido para o parâmetro ferro é de 0,3 mg/L. No entanto, concentrações de até 2,4 mg/L para o ferro são permitidas, desde que esteja complexado com

produtos químicos, comprovadamente de baixo risco à saúde, conforme preconizado no Inciso VIII do Art. 14 da referida portaria (Brasil, 2021; Silva *et al*., 2023).

O teor de ferro presente na água em concentrações superiores a 0,3 mg/L, traz diversos inconvenientes e insegurança para seus usuários, principalmente, no que se refere a alteração da cor, gosto e odor da água, além de incrustações e corrosão nas redes de distribuição (Quansah; Obiri-Nyarko; Karikari, 2024; Thomaz *et al.*, 2023). Nesse sentido, essa é uma problemática que precisa ser resolvida, sobretudo em mananciais subterrâneos situados em zonas rurais da Amazônia. Região, que de acordo com Silva *et al*, (2023), as águas são frequentemente alteradas, sobretudo pela dissolução de ferro e manganês proveniente de rochas e minerais.

Assim sendo, buscar e aprimorar alternativas simplificadas de tratamento da água, onde o saneamento básico se apresenta de forma desfavorável é essencial, tendo em vista que os métodos convencionais exigem grandes obras de engenharia, o que se torna economicamente inviável nessas localidades (García-Avila *et al*, 2021; Castro-Jiménez *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2023). De acordo com Moruzzi e Reali (2012), duas etapas principais são necessárias para a remoção de ferro da água, sendo: a oxidação e a remoção do precipitado formado.

Em conformidade com a afirmação supracitada, esta pesquisa visa contribuir com maiores informações, no que se refere a eficiência de duas técnicas de tratamento de água, sendo: cloração seguida de filtração e filtração simples, bem como analisar qual o meio filtrante mais eficiente, entre: a areia, antracito e a zeólita, na remoção de ferro em águas subterrâneas. Dessa forma, diante da problématica apresentada, é fundamental que sejam realizados maiores estudos para atender, não só o padrão de potabilidade estabelecido pela portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021, como também viabilizar o acesso universal à água potável conforme prevê o ODS 6, até 2030 (IPEA, 2019).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar e comparar a eficiência de diferentes meios filtrantes, sendo estes a areia, zeólita e o antracito, na remoção de ferro em águas subterrâneas no município de Altamira-PA.

### 2.2 Específicos

- Definir os parâmetros operacionais do sistema: taxa de filtração, perda de carga e carreira de filtração;
- Avaliar a necessidade e a eficiência do Hipoclorito de Sódio (NaClO) seguido da filtração na remoção de cor, turbidez e ferro, dos diferentes meios filtrantes.
- Analisar a eficiência da filtração simples na remoção de cor, turbidez e ferro, dos diferentes meios filtrantes.
- Relacionar os resultados adquiridos nas análises de água com os padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente (GM nº 888/2021).

## 3. REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1 Água Potável, Saúde Pública e Saneamento Básico

O fornecimento de água potável em qualidade e quantidade suficiente para atender às necessidades da população, está diretamente relacionado ao direito universal à vida, à cidadania e a promoção da dignidade humana. Aspectos nos quais estão assegurados pelo artigo 196 da Constituição Federal de 1988, no qual menciona que “ A saúde é direito de todos e dever do Estado, garantido mediante políticas sociais e econômicas que visem à redução do risco de doença e de outros agravos e ao acesso universal e igualitário às ações e serviços para sua promoção, proteção e recuperação” (BRASIL, 1988).

No Brasil a portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021, estabelece os parâmetros da qualidade da água. Esta regulamentação aplica-se a todos os recursos hídricos destinados ao consumo humano, seja através de sistemas de abastecimento coletivo, soluções alternativas coletivas simplificadas ou distribuição por caminhão-pipa. Conforme à referida portaria , a qualidade da água deve ser monitorada e controlada pela vigilância de saúde, garantindo que os parâmetros analisados estejam dentro dos padrões de potabilidade para evitar riscos à saúde pública (BRASIL, 2021).

Nesse sentido, o acesso à água segura é um dos componentes principais do saneamento básico, uma vez que é uma das bases para garantir a saúde pública e a

qualidade de vida. De acordo com Janini e Penna, (2021) e Vitor *et al*. (2021) o saneamento básico é composto por diversas atividades que garantem, não só os direitos sociais, mas também reduzem significativamente as situações de vulnerabilidade.

Além disso, o saneamento básico contribui para a preservação e equilíbrio do meio ambiente, promove a prevenção e combate de doenças, associado a isso favorece o desenvolvimento econômico e social, visto que de acordo com Vitor *et al.* (2021), cada real investido em saneamento resulta em uma economia de quatro reais em despesas de saúde.

Isso ocorre porque o saneamento eficaz previne doenças, como febre tifoide, cólera, hepatite A e E, e gastroenterites, causadas por bactérias, vírus e parasitas, que por consequência diminui a necessidade de tratamentos médicos, permitindo que recursos sejam direcionados para outras áreas essenciais, como educação e infraestrutura. Além disso, um ambiente mais saudável melhora a produtividade e a qualidade de vida da população (Brasil, 2017; Campos *et al*., 2019; Vitor *et al*., 2021).

A lei n° 11.445/2007, conhecida como o marco regulatório do saneamento básico no Brasil, foi um avanço significativo na estruturação e organização de infraestruturas nesse setor, haja vista que estabeleceu diretrizes que promovem a universalização de melhorias e acesso a obras de sistemas de abastecimento de água para consumo humano, esgoto sanitário, gestão de resíduos sólidos e drenagem urbana. Em que 2020, esta lei foi modificada pela lei n° 14.026, para reforçar e ampliar esses princípios (Georgin *et al*., 2014; Janini; Penna, 2021).

Atrelado à isso, práticas de saneamento sustentável promovem o equilíbrio ecológico, bem como contribui para a manutenção dos ecossistemas, tendo em vista que o tratamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos e do esgoto sanitário, evita a contaminação dos corpos d'água e do solo, bem como protege a biodiversidade e os recursos naturais (Chaysiri; Chinviriyasit; Louis 2024)

Apesar dos avanços, a distribuição dos serviços de saneamento básico no Brasil é desigual, uma vez que as áreas urbanas geralmente têm melhores infraestruturas comparadas às zonas rurais, comunidades tradicionais e territórios indígenas. Essas áreas muitas vezes requerem soluções específicas, simplificadas e não convencionais, devido às dificuldades econômicas e geográficas de implementação de sistemas de abastecimento de água tradicionais (Cioletti Júnior; Carmo; Leite, 2018; Brasil, 2019; Brasil, 2021; Sabogal-Paz *et al*., 2020).

Para mais, conforme afirmam Castro-Jiménez *et al*, (2022) os sistemas convencionais de tratamento de água potável são inviáveis para as zonas rurais, visto que exigem processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção. Além disso esses sistemas demandam investimentos econômicos significativos, vastas áreas de terra, pessoal técnico permanente para operação e manutenção, além de extensas redes de distribuição. Diante desses desafios como afirmam Maiyo; Dasika; Jafvert, (2023), o acesso a água potável segura continua a ser um desafio global, sobretudo em áreas rurais.

Nesse contexto, a Portaria do Ministério da Saúde nº 3.174/2019 instituiu o Programa Saneamento Brasil Rural (PSBR), conforme estabelecido na Lei nº 11.445/2007, para atender à falta de oferta de serviços de saneamento básico nas zonas rurais. O PSBR, coordenado pela Fundação Nacional de Saúde, visa viabilizar o acesso e a ampliação dos serviços de saneamento básico nessas áreas, com base em planos que asseguram “a equidade, a integralidade, a intersetorialidade, a sustentabilidade dos serviços implantados, a participação e o controle social” (BRASIL, 2019).

Diante disso, autores como Lima; Girard, (2012); Barco, (2017); Campos *et al*., (2019); Monção; Veloso, (2021) corroboram que a captação de água subterrânea é a solução mais eficaz e de menor custo para as zonas rurais, uma vez que oferece mais segurança em relação à qualidade, visto que as formações geológicas atuam como reservatórios naturais de água, protegendo-a de poluentes e contaminações pelas ações antrópicas.

### 3.2 Presença de Ferro na Água e seus Inconvenientes

O planeta terra possui vastos recursos hídricos, porém a maior parte não é adequada para consumo humano, visto que 97% da água disponível é considerada salgada, apenas uma pequena fração de 3 % é água doce, e dentro dessa parcela 2,5 % se encontra em geleiras. Os 0,5 % do restante a maior parte está em aquíferos subterrâneos, que se encontram mais protegidos das interferências antrópicas, em relação a sua poluição e contaminação. Porém, estão mais suscetíveis a alterações naturais do meio onde se encontram (Chaves *et al*., 2022).

Sendo assim, a água subterrânea é a maior reserva de água doce do planeta, representando mais de 97% de toda a água doce disponível, excluindo as geleiras e

as calotas polares. Os 3% restantes são encontrados em águas superficiais. No entanto essas águas podem ter seu uso limitado por apresentarem características inadequadas quanto a sua qualidade. Dentre estas, uma das mais frequentes é a presença elevada de ferro dissolvido. Este fato ressalta a importância crucial das águas subterrâneas como recurso e a necessidade urgente de sua proteção (Silva *et al*., 2023).

As águas subterrâneas são frequentemente alteradas pelo ferro, que ocorre naturalmente em sua forma dissolvida devido à dissolução de rochas e minerais, podendo estar associado ao manganês. Esses minerais incluem principalmente óxidos (como hematita, magnetita e limonita), sulfetos, carbonatos e silicatos, que se dissolvem sob condições anaeróbicas na presença de agentes redutores, como matéria orgânica e sulfeto de hidrogênio (Silva *et al*., 2023).

Este processo é intensificado em condições de pH ácido, alta concentração de dióxido de carbono ($CO_2$) e baixo teor de oxigênio, favorecendo a formação de bicarbonato ferroso dissolvido (Lima; Girard, 2012; Moruzzi; Reali, 2012; Quansah; Obiri-Nyarko; Karikari, 2024; Thomaz *et al.*, 2023).

Na água, o ferro ocorre na forma iônica (ferro$^{+2}$) em ambientes anóxicos ou com pH inferior a 3. Em condições aeróbicas, os íons ferrosos se transformam em íons férricos, levando à formação de hidróxidos de ferro insolúveis (Lima; Girard, 2012; Winck, 2015; Paz, 2016; Barco, 2017; Mubarak *et al*., 2021).

A presença elevada de ferro na água, destinada ao abastecimento público, traz diversos problemas e insegurança para seus usuários, como sabor desagradável, cor, odor e incertezas quanto à qualidade da água para consumo. Além disso, pode provocar incrustações, obstruções, corrosão e depósitos nas redes de distribuição, favorecendo o crescimento de bactérias ferruginosas e reduzindo a vazão disponível no sistema. Também pode manchar roupas e utensílios domésticos e prejudicar vários processos industriais (Almeida *et al.*, 2017; Barco, 2017; Mubarak *et al*., 2021; Silva; Silva, 2021; Poliakov e Martynov, 2023; Quansah; Obiri-Nyarko; Karikari, 2024; Thomaz *et al.*, 2023).

Embora o ferro não seja considerado uma substância tóxica, e sim essencial para a saúde humana o seu consumo excessivo pode ter efeitos deletérios à saúde. O acúmulo de ferro nos tecidos ao longo do tempo pode causar alterações neurológicas, como a doença de Alzheimer e Parkinson (Fernandez *et al*., 2007; Paz, 2016; Barco, 2017).

Dessa forma, a presença de ferro nas águas subterrâneas, embora natural, pode apresentar desafios significativos para a qualidade da água e a saúde pública. Compreender as condições que levam ao seu tratamento adequado, bem como implementar estratégias eficazes de monitoramento, é crucial para garantir um abastecimento de água seguro e sustentável.

### 3.3 Remoção do Ferro da Água

No saneamento ambiental, existem vários métodos convencionais para a remoção de ferro na água. Entre os principais destacam-se a precipitação por meio da oxidação química ou por aeração com pH ajustado para valores acima da neutralidade. Os precipitados podem ser eliminados por meio de sistemas de filtração, flotação ou sedimentação (Mubarak *et al*., 2021).

Os sistemas de desferrização da água envolvem a oxidação dos compostos solúveis de sais ferrosos ($Fe^{2+}$), que são transparentes, em sais férricos ($Fe^{3+}$) insolúveis. Após a oxidação, seja por aeração ou métodos químicos, os minerais precipitam, resultando em uma coloração de vermelho a preto na água. Para isso, é comum utilizar oxigênio, permanganato de potássio, hipoclorito de sódio ou ozônio (Alves, 2008; Lima; Girard, 2012; Moruzzi; Reali, 2012; Maximila, 2016).

No entanto, muitos desses reagentes podem gerar compostos indesejáveis e prejudiciais à saúde, como os trihalometanos, que possuem grande potencial cancerígeno (Oliveira; Araújo; Duarte, 2020).

O tratamento por oxidação do ferro reduz a concentração solúvel, o que facilita a sua remoção em processos de separação sólido-líquido, por meio da filtração. Outra alternativa muito usada em mananciais subterrâneos, é a aeração em pH favorável, seguida de filtração em meio granular (Lima; Girard, 2012; Barco, 2017; Soares *et al*., 2021).

É importante considerar as características da água a ser tratada, pois a presença de matéria orgânica pode aumentar a demanda por oxidantes e formar subprodutos. Além disso, podem se formar compostos de ferro estáveis que dificultam a precipitação e remoção dos metais. Em águas com matéria orgânica, a oxidação química pode ser necessária, aliada à separação sólido-líquido para reter os precipitados (Lima; Girard, 2012; Maximila, 2016; Barco, 2017; Soares *et al*., 2021).

Dentro desse contexto, para águas com altos teores de ferro (> 5 mg/L),

recomenda-se a aeração combinada com filtração. A oxidação do ferro por cloração seguida de filtração é mais adequada para concentrações menores (< 2 mg/L), utilizando cloro gasoso ou hipoclorito (Winck, 2015; Paz, 2016; Soares *et al*., 2021). De acordo com Moruzzi; Reali, (2012) a quantidade teórica de cloro necessária para oxidar 1 mg/L de ferro solúvel é de 0,62 mg/L.

Dessa forma, buscar e avaliar os diferentes métodos de tratamento de água na remoção de ferro é essencial para que ocorra a redução das disparidades sociais no acesso às necessidades básicas da população, tendo em vista que a água destinada ao consumo humano deve se apresentar isenta de impurezas.

### 3.4 Areia, Antracito e Zeólita como meios Filtrantes

Para solucionar os desafios relacionados à qualidade da água, os sistemas de filtração são comumentes utilizados, visto que é um método eficiente na remoção de sedimentos, microrganismos, produtos químicos e metais pesados, devido sua capacidade de reter partículas (Cescon e Jiang, 2020; Medeiros *et al*., 2020). De acordo com García-Ávila *et al*, (2024) esse método proporciona a purificação da água, proporcionando um abastecimento de água seguro e de qualidade para o consumo humano.

Existem diversos meios filtrantes utilizados para o tratamento de água para torná-la potável, incluindo cascalho, areia, antracito, carvão ativado, quartzo, entre outros (Waangsir *et al*., 2023). Além disso, as zeólitas, têm sido investigadas para a remoção de ferro e manganês da água (Mubarak *et al*., 2021).

Conforme afirmam Castro-Jiménez *et al*, (2022) e García-Ávila *et al*, (2024), a areia são os meios filtrantes mais utilizados para o tratamento de água, visto que é um material que amplia a capacidade de reter partículas finas e melhorar a clareza da água.

A areia melhora a qualidade da água ao remover partículas, produtos químicos orgânicos dissolvidos e outros contaminantes, reduzindo assim a turbidez e os problemas de sabor e odor associados. Ademais é ideal que a areia deve possuir um tamanho uniforme, para ter uma área de superfície alta, bem como uma porosidade alta, pois uma ampla gama de tamanhos de partículas diminuirá a porosidade, o que, por sua vez, diminuirá a Tempo de residência hidraúlica (Maiyo; Dasika; Jafvert, 2023).

De acordo com Wichtmann *et al*. (2019), outro material amplamente utilizado em sistemas de filtração de água é o carvão antracito. Apesar de possuir uma menor densidade em comparação com a areia permite uma maior porosidade no leito filtrante, facilitando o fluxo de água o que reduz a perda de carga. A superfície irregular e angular dos grãos de antracito aumenta a área de contato com a água, o que melhora a retenção de partículas suspensas e contaminantes.

A Zeólita, por sua vez, é um material adsorvente muito utilizado como meio filtrante na retirada de íons metálicos para a tratamento de água, uma vez que tem a habilidade de troca iônica com a água, favorecendo a retenção de metais pesados como íons de ferro, uma vez que a estrutura porosa das zeólitas permite uma alta capacidade de adsorção, capturando eficientemente íons metálicos e outros contaminantes. Ademais, é um mineral, que possui estrutura tridimensional de tetraedros de $SiO_4$ e $AlO_4$, em que a clinoptilotita e a phillipsita, possuem uma maior propensão de troca iônica (Vistuba, 2010; Paz, 2016; Mubarak *et al*., 2021).

A superfície da zeólita possui uma carga negativa adicional devido à substituição parcial de silício por átomos de alumínio na sua estrutura de rede cristalina, equilibrada pelos cátions circundantes. Esses cátions ou contra-íons podem ser substituídos por outros cátions que estejam na solução em contato (Mubarak *et al*., 2021). Dessa forma o tratamento de água por filtração adsortiva é um processo crucial para a remoção de elementos inorgânicos, destacando-se pela sua eficiência e eficácia. Esta técnica envolve a retenção de íons metálicos na superfície do meio filtrante, através de reações físicas ou químicas.

Para tanto, o tratamento de água por meio de diferentes meios filtrantes, busca indicar a melhor opção em custo benefício e incentivar medidas para solucionar problemas de qualidade de água nas zonas rurais, haja vista que o tratamento de água convencional é inviável nas zonas rurais, locais onde o saneamento básico se apresenta de forma desfavorável. Dessa forma, é notório a necessidade de se buscar e aprimorar alternativas simplificadas de potabilização da água.

## 4. MATERIAS E MÉTODOS

Esta pesquisa é classificada como aplicada, segundo Cesário *et al*. (2020), pois visa resolver problemas práticos e contribuir socialmente com informações sobre o tema. O objetivo é realizar uma análise descritiva e exploratório dos conceitos,

características da área de estudo e do sistema de filtração, e aprofundar o entendimento sobre as causas e efeitos da presença de ferro na água (ZANELLA, 2013; EVÊNCIO *et al*., 2019).

A metodologia inclui uma pesquisa bibliográfica para embasar teoricamente o estudo e levantar informações sobre tratamento de água, adsorção, meios filtrantes, remoção de ferro, utilizando bases como Science Direct, Web of Science e Scopus (GIL, 2002). Além disso, será realizada uma pesquisa-ação para resolver o problema da qualidade da água do poço em estudo, propondo soluções práticas (GERHARDT e SILVEIRA, 2009).

A abordagem é qualitativa, focada na interpretação dos resultados de adsorção de ferro nas análises de água bruta e tratada. O método utilizado é o hipotético-dedutivo, testando a hipótese de que areia, antracito e zeólita são eficientes na remoção de ferro da água (GIL, 2002; OLIVEIRA, 2011; ZANELLA, 2013).

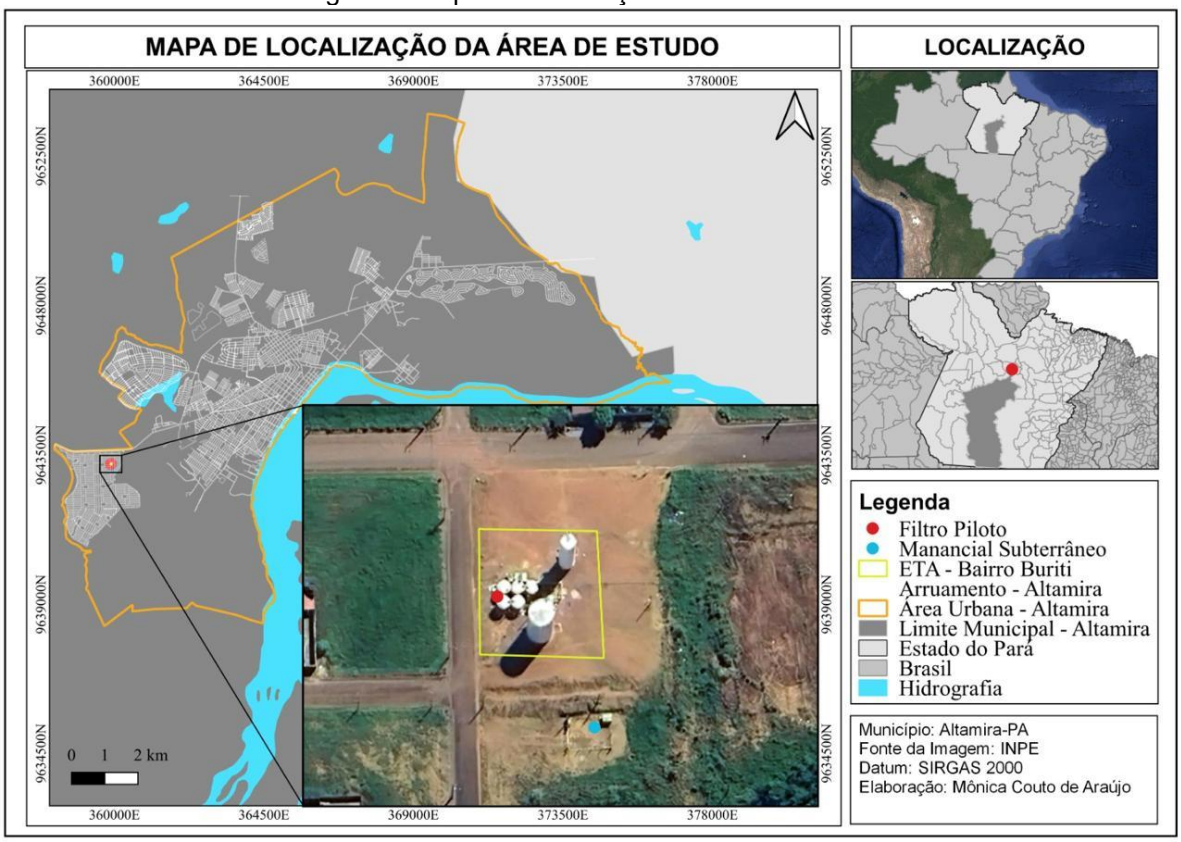
Para conduzir a pesquisa, realizou-se um estudo preliminar sobre técnicas de tratamento de água voltadas para a remoção de ferro. Foram selecionadas duas alternativas economicamente viáveis para serem aplicadas, não só na zona urbana, mas principalmente nas zonas rurais, sendo: oxidação por cloro seguida de filtração e filtração simples. A pesquisa foi dividida em três etapas: (a) pré-operação do filtro; (b) operação (oxidação + filtração e filtração simples); e (c) avaliação da eficiência do sistema.

### 4.1 Área de Estudo

O sistema de tratamento de água avaliado foi instalado logo após a saída de água bruta de um dos poços que abastecem uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada na zona urbana do município de Altamira-PA, região Norte do Brasil. A instalação ocorreu no bairro Buriti, sob as coordenadas geográficas 3°16’8,28” S e 52°23’24,62” W, conforme ilustrado na Figura 1.

O Município de Altamira está localizado na região Norte do Brasil, e é considerado o maior município em área territorial do mundo, com 159.533,306 km². A sede municipal localiza-se a 03º11’41” de latitude Sul e 52º12’33” de longitude a Oeste de Greenwich (Altamira, 2010; Altamira, 2022; Rodrigues *et al.,* 2020). A população residente em 2022, estimada pelo último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, é de 126.279 habitantes (IBGE, 2022).

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo

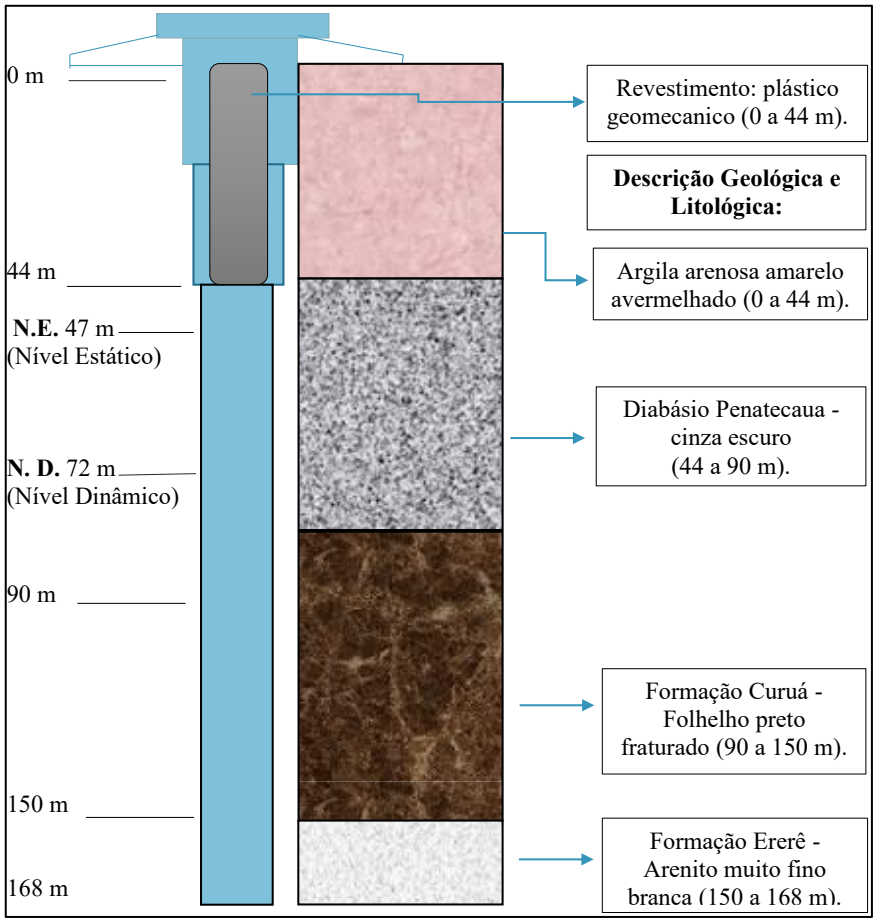



Fonte: Autoria (2025).

Ademais, o poço em estudo, diz respeito ao aquífero fraturado norte (ANA, 2014). Sendo o Aquífero fissural livre (SIAGAS, 2014). Pertencente a Bacia do Amazonas na forma de diques e soleiras de Diabásio, rochas estas denominadas de Diabásio Penatecaua (VASQUEZ; SOUSA; CARVALHO, 2008). A bacia hidrográfica é o Rio Amazonas e a sub-bacia é o Rio Amazonas, Xingu, Iriri e Paru (SIAGAS, 2014).

Tem como tipo de formação geológica o Diabásio Penatecaua, Formação Curuá e Formação Ererê e como características litológicas: argila arenosa amarelo avermelhado, diabásio cinza escuro, folhelho preto fraturado e arenito muito fino branca, como mostra o perfil construtivo do poço (Figura 2), elaborado com base nas informações disponíveis no SIAGAS, 2014.

Figura 2: Perfil construtivo do poço tubular e constituição geológica




Fonte: Adaptado (dados gerais do poço, disponível no SIAGAS, 2014).

Os solos predominantes na região de Altamira correspondem ao Argissolos (podzólico) e Latossolos Amarelos com texturas médias e argilosas. Com presença de manchas de Terra Roxa Estruturada (ALTAMIRA, 2022). O solo que caracteriza o local de estudo de acordo com a Ficha Técnica do Poço – disponível no SIAGAS (2014) - é o solo argiloso arenoso de cor amarelo avermelhado. O que pode explicar a presença de ferro na água, visto que de acordo com Silva *et al*, (2023), o ferro é característicos nesses tipos de solos, pois são ricos de materiais inorgânicos.

### 4.2 Sistema de Tratamento de Água

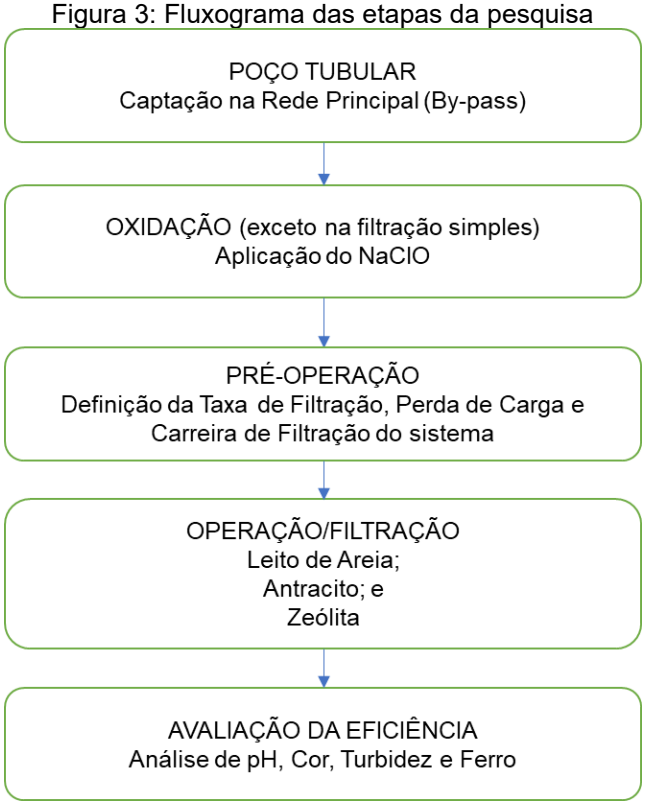
O sistema utilizado para a remoção de ferro da água proveniente do manancial subterrâneo foi um filtro de fluxo descendente em escala piloto, equipado com um sistema de retrolavagem de fluxo ascendente.

Na fase de pré-operação do filtro, foram definidos os parâmetros operacionais,

incluindo a taxa de filtração, a perda de carga e a carreira de filtração dos meios filtrantes (areia, antracito e zeólita). Durante a operação do sistema, o desempenho dos meios filtrantes foi analisado tanto no processo de filtração simples quanto na oxidação seguida de filtração, esta última aplicada caso a filtração simples não se mostrasse eficiente na remoção do ferro. Referente à avaliação da eficiência, foram analisadas a remoção de ferro, turbidez e cor da água, além da determinação do Potencial Hidrogeniônico (pH), permitindo a comparação do desempenho dos diferentes meios filtrantes.

O fluxograma da pesquisa está ilustrado na Figura 3, a qual apresenta a captação através do poço tubular, seguido do dosador do oxidante (NaClO), pré-operação, filtração e avaliação da eficiência dos diferentes meios filtrantes.

Figura 3: Fluxograma das etapas da pesquisa




Fonte: Autoria (2024).

### 4.3 Descrição do sistema

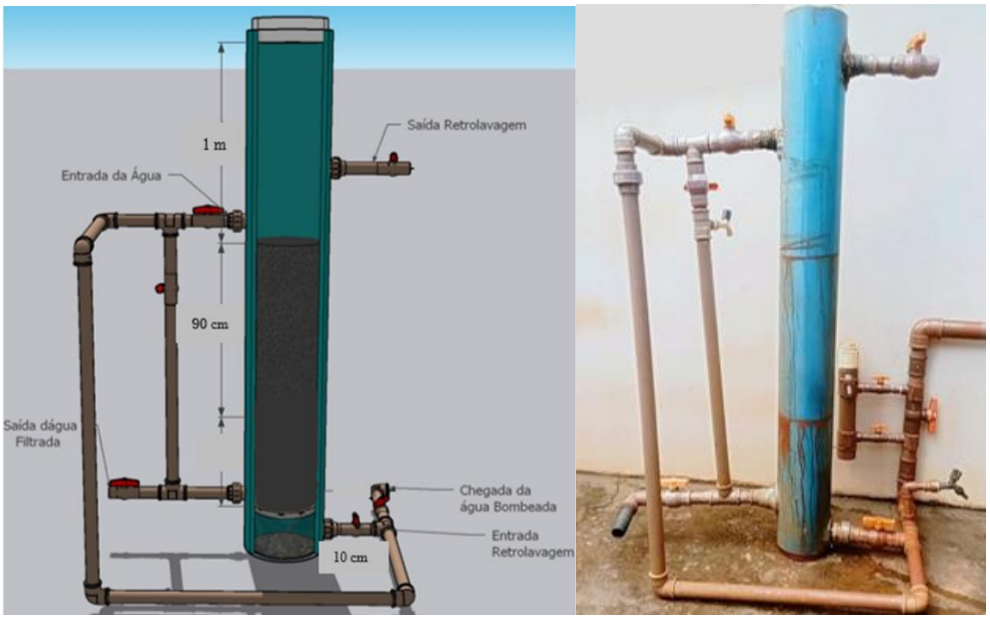
O filtro piloto foi construído utilizando tubo de PVC com diâmetro de 150 mm e altura de 2,0 metros, equipado com conexões em PVC de 40 mm. Antes do filtro, foi instalado um clorado manual, confeccionado com tubo de PVC de 50 mm e duas reduções de 25 mm de diâmetro, cada uma contendo um registro, permitindo o controle da dosagem no processo de oxidação, a qual foi realizado por meio da adição

de Hipoclorito de Sódio (NaClO). O clorado foi conectado ao filtro piloto por uma tubulação de contato com diâmetro de 40 mm e comprimento de 3,3 m. Na Figura 4 é apresentado o sistema piloto e o sistema completo.

O leito filtrante com altura de 90 cm foi preenchido sequencialmente com três meios filtrantes distintos: areia, antracito e zeólita. Acima do leito filtrante, foi mantido um espaço livre de 1 metro, destinado à avaliação da perda de carga e da carreira de filtração do sistema. Todos os meios filtrantes foram previamente lavados para remoção de impurezas.

A instalação do filtro ocorreu por meio de um by-pass no sistema de abastecimento existente, possibilitando adequar a taxa de filtração à capacidade do sistema piloto, conforme a NBR 12.216/92.

Figura 4: Desenho esquemático do filtro piloto e sistema piloto completo.




Fonte: Autoria (2025).

### 4.4 Definição dos parâmetros operacionais

Para o funcionamento adequado do filtro foi definido os seguintes parâmetros operacionais: a taxa de filtração, perda de carga, carreira de filtração e retrolavagem.

#### 4.4.1. Taxa de Filtração

A taxa de filtração adotada neste estudo refere-se a projetos de filtros rápidos, de camada simples e fluxo descendente, sendo calculada conforme a norma NBR 12.216/1992, que estabelece diretrizes para projetos de estação de tratamento de água para abastecimento público (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

No dimensionamento da vazão do sistema piloto, foram considerados dois parâmetros iniciais: o diâmetro do filtro e a taxa de filtração. A taxa de filtração adotada foi de 180 m³/m²/dia. Para esse cálculo, utilizou-se a Equação 1.

$$Q = \frac{q}{A} \qquad (1)$$

Onde:

q – Taxa de filtração ($m^3.m^2$/dia);

A – Área do filtro ($m^2$);

Q – Vazão nominal (L/s) .

### 4.4.2 Perda de Carga e Carreira de Filtração

A perda de carga corresponde à altura da lâmina d'água ao longo da carreira de filtração e é um parâmetro essencial para monitorar o comportamento do filtro. Essa medida é fundamental para definir o tempo da carreira de filtração, já que o aumento da perda de carga pode comprometer a eficiência do filtro. Além disso, esse fenômeno pode ser observado quando ocorre o transpasse, que acontece quando a capacidade do meio filtrante de reter impurezas é superada. O transpasse ocorre devido à sobrecarga do sistema de filtração, geralmente após um determinado período de operação do leito filtrante (BRASIL, 2017).

Diante disso, a perda de carga foi monitorada a cada troca de material filtrante, em que foi respeitado o tempo máximo de 10 horas estabelecido junto a Estação de Tratamento de Água (ETA), onde o sistema piloto foi implantado. Esse tempo foi observado com o objetivo de estudar a perda de carga antes das coletas para análise da eficiência do sistema. Para essa análise, o filtro foi colocado em operação, funcionando da seguinte forma:  a água entrar no filtro, passa pelo leito filtrante e sai filtrada pelo orifício inferior, sendo um fluxo de água contínuo. Durante o monitoramento, o nível da água foi medido a cada hora, e, caso a perda de carga atingisse a altura máxima de 1 m acima do leito filtrante, a carreira de filtração era

considerada finalizada.

### 4.4.3. Retrolavagem

O processo de retrolavagem do sistema acontece por contrafluxo, ou seja, de forma ascendente, uma vez que o filtro funciona em fluxo descendente. Nesse sentido, de acordo com Michelan; Sens e Dalsasso (2015), esse procedimento é necessário pra que ocorra a expansão do meio filtrante e por conseguinte carregue as impurezas/partículas depositadas no material filtrante. A retrolavagem deve ocorre quando a perda de carga atinge sua altura máxima, a qual acontece quando o filtro atinge em torno de 1 metro de altura de lâmina d'água, ou quando ocorre o transpasse em excesso das impurezas.

## 4.5 Avaliação da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes

A periodicidade das coletas de amostras de água foi definida com base nas condições operacionais da Estação de Tratamento de Água. Os intervalos de coleta foram estabelecidos em conjunto com a equipe gestora da ETA, de modo a não comprometer o abastecimento da população nem interferir no funcionamento da unidade. Apesar do sistema operar em regime contínuo, 24 horas por dia, há a presença de uma bóia automática que interrompe periodicamente o bombeamento dos poços. Dessa forma, para assegurar a continuidade do fluxo durante o estudo, foi necessário ajustar os tempos de operação do sistema piloto.

Diante disso, ficou definido junto à gestão da ETA, a realização de três carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas para cada meio filtrante - areia, antracito e zeólita. Exceto para o processo de oxidação seguido de filtração utilizando a areia como meio filtrante, em que foi realizado quatro carreiras de filtração, sendo duas com duração de 10 horas.

Com o tempo das carreiras de filtração estabelecidos, foi definido os intervalos de coletas das amostras de água para as análises de 2 em 2 horas. Os parametros que foram analisados para testar a eficiencia dos meios filtrantes foram o pH, cor, turbidez e ferro tanto da água tratada como da bruta. Para o cálculo da eficiência foi usado a Equação 2:

$$E=\frac{Cb-Ct}{Cb} * 100 \qquad (2)$$

Onde:

E = Eficiência de remoção

Cb = Concentração na água bruta

Ct = Concentração na água tratada

As amostras foram coletadas em frascos polietileno devidamente esterilizados e armazenadas em isopor com gelo, e levadas para laboratório da Coordenadoria de Saneamento do Município de Altamira (COSALT) para análises, com exceção do pH que foi medido in locu. Foi usado a metodologia *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*. Conforme especifica o Tabela 1 abaixo:

**Tabela 1**: Parâmetros físico-químicos e métodos utilizados

| Parâmetro de qualidade da água | Aparelhos Utilizados | Método |
|---|---|---|
| Ferro (Fe) | HANNA Checker | SMEWW, 23ªEd.3500-Fe |
| Turbidez | Turbidity TU430 - AKSO | SMEWW, 23ªEd.2130B |
| Cor | Colorímetro DM-COR | SMEWW, 23ªEd.2120C |
| Cloro | QUIMIS Q406CFFN | SMWW 23ª Edição, 2012, Método 4500 Cl - G |
| Potencial Hidrogeniônico (pH) | HQ11d - HACH | SMEWW, 23ªEd.4500-$H^+$B |
| Temperatura | HQ11d - HACH | SMEWW, 23 ªEd.2550B |

Dando seguimento, os resultados das amostras da água tratada foram comparados com a Portaria nº 888/2021, que dispõe sobre a qualidade da água e seu padrão de potabilidade, bem como verificado qual foi o meio filtrante que obteve a melhor eficiência no tratamento de água, em especial na remoção de ferro.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Taxa de filtração

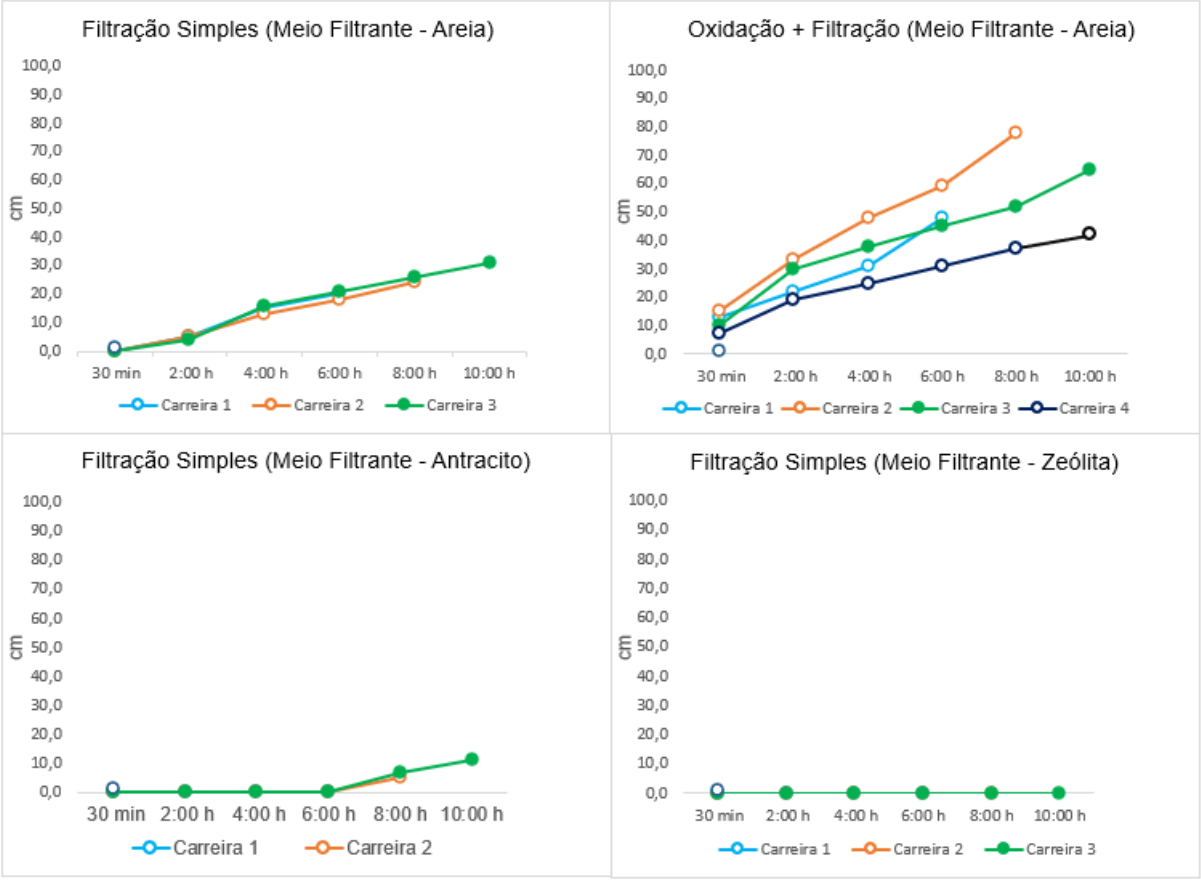
O filtro foi operado com uma vazão de entrada de 0,037 L/s, equivalente a 2,2 L/min, conforme o dimensionamento e as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12216/1992, que prevê uma taxa de filtração de 180 m³/m²/dia. A medição dessa

vazão em campo foi realizada com o auxílio de um balde graduado, durante um período cronometrado de 1 minuto.

### 5.2 Perda de Carga e Carreira de Filtração

O monitoramento da perda de carga de ambos os meios filtrantes foi analisada a cada 2 horas ao longo do funcionamento do filtro. Na Figura 5, são apresentados os comportamentos das carreiras de filtração dos ensaios dos diferentes meios filtrantes, com os correspondente progresso da perda de carga.

Figura 5: Perda de carga nas carreiras de filtração dos meios filtrantes: Areia, Antracito e Zeólita




Fonte: Autoria (2025)

Percebe-se que, as maiores perdas de carga registradas nas carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, no processo de filtração simples, utilizando a areia como meio filtrante, foram, respectivamente, de 20 cm (carreira 1), 24 cm (carreira 2), e 31 cm (carreira 3).

No processo de oxidação seguido de filtração, também com areia como meio filtrante, as perdas de carga registradas foram de 48 cm (carreira 1), 78 cm (carreira

2), 65 cm (carreira 3) e 42 cm (carreira 4). Essas perdas ocorreram ao longo das carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, sendo que houve duas carreiras com duração de 10 horas.

Para o processo de filtração simples utilizando antracito como meio filtrante, as perdas de carga registradas foram de 0 cm (carreira 1), 5 cm (carreira 2) e 11 cm (carreira 3), nas carreiras de 6, 8 e 10 horas, respectivamente.

Por fim, no processo de filtração simples utilizando zeólita como meio filtrante, não foi registrada perda de carga ao longo das carreiras de filtração.

Diante disso, os resultados das perdas de carga indicam que o material filtrante mais eficiente ao longo do tempo foi a zeólita, uma vez que não apresentou perda de carga. Dessa forma, tem-se como hipótese que esse material permitiria uma carreira de filtração mais longa em comparação com os demais meios filtrantes avaliados.

Logo em seguida, seria o carvão antracito o mais indicado, visto que seus resultados foram próximos aos da zeólita, no qual apresentou uma pequena perda de carga entre 5 e 7 cm a partir das 8 horas (carreiras 1 e 2) de funcionamento, e de 11 cm (carreira 3), após 10 horas de operação.

Em relação ao meio filtrante – areia –, o método de filtração simples demonstrou maior eficiência em termos de perda de carga quando comparado ao processo de oxidação seguido de filtração. No processo de filtração simples, observou-se que a perda de carga permaneceu constante em ambas as carreiras, com uma prevalência de 5 cm a cada 2 horas. No entanto, nas primeiras 2 horas de operação do filtro, a perda de carga variou entre 8 e 12 cm. Por outro lado, no processo de oxidação seguido de filtração, a perda de carga apresentou grande variação ao longo de todas as carreiras, sendo esse o método que registrou a maior perda de carga entre os analisados.

Ademais, verificou-se que nenhuma das carreiras de filtração, de ambos os materiais, atingiu a perda de carga necessária para interromper a operação do filtro, que ocorreria quando a lâmina d’água alcançasse 1 metro de altura acima do leito filtrante.

Conforme o estudo de Vistuba (2010), a duração recomendada para carreiras de filtração em filtros rápidos deve ser superior a 12 horas, sendo considerado eficiente quando ultrapassa 24 horas.

Nesse contexto, o presente estudo demonstrou eficiência, uma vez que nenhuma das carreiras de filtração, independentemente do material filtrante utilizado,

atingiu a perda de carga necessária para interromper a operação do filtro. A interrupção ocorreria caso a lâmina d'água alcançasse 1 metro acima do leito filtrante, conforme indicado por Michelan, Sens e Dalsasso (2015). A maior perda de carga registrada foi no processo de oxidação com cloro seguido de filtração, utilizando areia como meio filtrante, atingindo 78 cm na segunda carreira de filtração. A Figura 6 abaixo exemplifica o processo de perda de carga.

Figura 6: Perda de carga acima do material filtrante

Fonte: Autoria (2024)

Dessa forma, a perda de carga representa a resistência imposta pelo leito filtrante ao longo do tempo, o que influencia diretamente a eficiência do processo de filtração e a necessidade de intervenção operacional, por meio da retrolavagem.

### 5.3 Retrolavagem

A retrolavagem do sistema ocorreu por contrafluxo, ou seja, de forma ascendente, permitindo a expansão do meio filtrante e, consequentemente, a remoção das impurezas e partículas retidas durante o processo de filtração.

O procedimento foi realizado no início e no final de cada carreira de filtração, para melhorar a remoção das impurezas acumuladas no material filtrante e contribuir para a otimização da eficiência do sistema. O processo de retrolavagem teve duração entre 10 e 15 minutos ao término de cada carreira de filtração e 5 minutos antes do início da próxima.

Na Figura 7 é mostrado o processo de retrolavagem, evidenciando a necessidade deste procedimento para garantir a eficiência do sistema.

Figura 7: Retrolavagem do filtro no final e no início das carreiras de filtração

Fonte: Autoria (2024)

## 5.4 Avaliação da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes

### 5.4.1 Análise da Água Bruta

Para verificação do teor de ferro na água bruta, foram coletadas três amostras em dias alternados. As análises laboratoriais indicaram a presença de ferro na ordem de 5 mg/L. Esses resultados foram consistentes com os dados de monitoramento da ETA, conforme apresentado no Tabela 2.

**Tabela 2:** Valores de ferro encontrados em amostras de água bruta

| Parâmetro | Amostra 1 (30/09/2024) | Amostra 2 (09/10/2024) | Amostra 3 (14/12/2024) | VMP* |
|---|---|---|---|---|
| Ferro (Mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0,3 |

* Valor máximo permitido pela Portaria n° 888/2021

A seguir são apresentados nas (Figuras 8, 9 e 10), os resultados das análises laboratoriais da água bruta, destacando os teores de ferro.

Figura 8, 9 e 10: Análises do teor de ferro na água bruta

Fonte: Autoria (2024)

Os resultados das análises da água bruta indicam que a concentração de ferro excede o limite máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela legislação vigente para consumo humano, o que torna essencial a adoção de medidas de tratamento. Segundo Alves, Castro e Sousa (2021), a instalação de estações de tratamento na Amazônia é fundamental, pois o alto teor de ferro é uma característica do Sistema Aquífero na região.

A presença de ferro na água pode ser justificada por meio das características dos solos e rochas onde o poço foi perfurado, uma vez que os latossolos avermelhados ou amarelos surgem devido a presença de ferro, a qual possuem predominância do mineral argila (argilosos), tendo na composição mineralógica a caulinita e óxidos de ferro e alumínio.

Essas características dos solos são devido a formação de compostos (óxidos), justamente pelo elemento químico ferro, advindo das alterações e intemperismos das rochas que consequentemente a rocha se torna mais porosa o que passa a reter água e compostos químicos (LIMA; LIMA; MELO, 2007; CORRÊA *et al.,* 2008; TAVARES, 2008).

A argila é comum na forma de minerais silicatados devido a presença de silício, bem como óxidos de ferro e alumínio. Estes minerais por sua vez se apresentam em estado coloidal e possuem cargas na sua superfície, com isso se torna favorável a adsorção de íons, sendo está a atração dos íons de cargas opostas, em detrimento das cargas dos minerais (LIMA; LIMA; MELO, 2007; PEREIRA *et al.*, 2020).

### 5.4.2 Eficiência da Filtração Simples com Areia

Para a avaliação da eficiência da areia como meio filtrante, foi utilizada areia com granulometria correspondente a 0,45 a 0,55 mm, sendo realizadas 3 carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, respectivamente.

A Tabela 3 apresenta os resultados das análises das amostras de água realizadas após cada coleta, contemplando os parâmetros de turbidez, cor, concentração de ferro, pH e temperatura, avaliados tanto na água bruta quanto na água tratada.

**Tabela 3:** Resultados da filtração simples com areia.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 14,9 | 14,1 | 15,6 | 15,9 | 15,8 | 15,5 | 16,2 | 16,7 | 16,4 | 15,6 | 14,8 | 15,3 | 16,1 | 16,3 | 15,9 |
| | Cor (UC) | 27,9 | 23,6 | 23,9 | 26,3 | 18,1 | 19,2 | 18,8 | 20 | 19,7 | 15,4 | 17,8 | 16,6 | 17,3 | 19,3 | 29,7 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | pH | 7,16 | 7,2 | 7,18 | 7,16 | 7,13 | 7,19 | 7,17 | 7,2 | 7,25 | 7,16 | 7,15 | 7,16 | 7,16 | 7,15 | 7,11 |
| | Temp. (°C) | 29,1 | 30,4 | 31,3 | 31,8 | 30,3 | 30,7 | 31,3 | 31,7 | 30,4 | 29,7 | 30,3 | 31,1 | 31,3 | 31,7 | 31,7 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 2,45 | 2,48 | 2,69 | 2,72 | 2,34 | 2,4 | 2,38 | 2,49 | 2,61 | 2,19 | 2,26 | 2,27 | 2,34 | 2,38 | 2,29 |
| | Cor (UC) | 16,9 | 18,8 | 16,4 | 18,6 | 10,3 | 10,1 | 11,2 | 11,6 | 11,8 | 10,6 | 10,1 | 11,6 | 13,8 | 10,8 | 12,9 |
| | Ferro (mg/L) | 0,96 | 1,9 | 1,47 | 1,5 | 0,65 | 1,27 | 1,12 | 0,81 | 3,87 | 0,8 | 0,8 | 0,53 | 0,39 | 4,33 | 5 |
| | pH | 7,16 | 7,15 | 7,15 | 7,16 | 7,1 | 7,17 | 7,14 | 7,12 | 7,25 | 7,15 | 7,14 | 7,14 | 7,17 | 7,15 | 7,12 |
| | Temp. (°C) | 29,7 | 30,6 | 31,5 | 32 | 30,5 | 31 | 31,8 | 32,3 | 31 | 29,9 | 30,4 | 31,2 | 31,7 | 32,2 | 32,2 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 4, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância dos parâmetros turbidez, cor, ferro, pH e temperatura, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

**Tabela 4:** Eficiência da filtração simples com areia.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 14,1 | 15,9 | 15,13 | 0,8 | 0,64 | 15,5 | 16,7 | 16,12 | 0,48 | 0,23 | 14,8 | 16,3 | 15,67 | 0,55 | 0,31 |
| | Cor (UC) | 23,6 | 27,9 | 25,43 | 2,05 | 4,18 | 18,1 | 20 | 19,16 | 0,75 | 0,56 | 15,4 | 29,7 | 19,35 | 5,23 | 27,38 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | pH | 7,16 | 7,2 | 7,18 | 0,02 | 0 | 7,13 | 7,25 | 7,19 | 0,04 | 0 | 7,11 | 7,16 | 7,15 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 29,1 | 31,8 | 30,65 | 1,18 | 1,4 | 30,3 | 31,7 | 30,88 | 0,6 | 0,36 | 29,7 | 31,7 | 30,97 | 0,81 | 0,65 |
| | Duração (h) | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 2,45 | 2,72 | 2,59 | 0,14 | 0,02 | 2,34 | 2,61 | 2,44 | 0,11 | 0,01 | 2,19 | 2,38 | 2,29 | 0,07 | 0 |
| | Cor (UC) | 16,4 | 18,8 | 17,68 | 1,2 | 1,45 | 10,1 | 11,8 | 11 | 0,76 | 0,59 | 10,1 | 13,8 | 11,63 | 1,44 | 2,08 |
| | Ferro (mg/L) | 0,96 | 1,9 | 1,46 | 0,39 | 0,15 | 0,65 | 3,87 | 1,54 | 1,32 | 1,75 | 0,39 | 5 | 1,98 | 2,1 | 4,41 |
| | pH | 7,15 | 7,16 | 7,16 | 0,01 | 0 | 7,1 | 7,25 | 7,16 | 0,06 | 0 | 7,12 | 7,17 | 7,15 | 0,02 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp. (°C) | 29,7 | 32 | 30,95 | 1,01 | 1,03 | 30,5 | 32,3 | 31,32 | 0,72 | 0,52 | 29,9 | 32,2 | 31,27 | 0,95 | 0,91 |
| Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |

Fonte: Autoria (2025).

Em relação aos parâmetros de pH e temperatura, não foram verificadas variações significativas entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,11 a 7,25 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,10 e 7,25. Já a temperatura variou de 29,1°C a 31,8°C na água bruta e de 29,7°C a 32,3°C na água tratada.

Em termos de turbidez, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece, para águas subterrâneas, pós-filtração rápida, o limite de 0,5 uT em 95% das amostras coletadas a cada 2 horas, sendo permitido atingir até 1,0 uT nos 5% das amostras mensais coletadas. E para o processo de pós-desinfecção, o limite estabelecido é de 1,0 uT em 95% das amostras coletadas semanalmente e 5,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.

Os resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram valor mínimo de 14,1 uT e máximo de 16,7 uT, observados após 2 horas do início da operação da carreira de filtração 1 e 6 horas após a carreira de filtração 2, respectivamente, indicando, portanto, a necessidade de tratamento voltado para a redução da turbidez, em razão dos valores observados na água bruta serem superiores aos definidos na Portaria nº 888. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 2,19 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 3, enquanto o maior valor foi de 2,61 verificado na carreira de filtração 2, após 6 horas de operação.

Desse modo, embora a água tratada tenha apresentado uma redução nos níveis de turbidez os valores registrados ainda ultrapassaram os padrões de potabilidade exigidos para pós-filtração rápida. Nesse contexto, reforça-se a importância dos processos de tratamento e do monitoramento contínuo, uma vez que o cumprimento desses parâmetros é essencial para assegurar a potabilidade da água, minimizar riscos à saúde pública e garantir um abastecimento seguro e de qualidade.

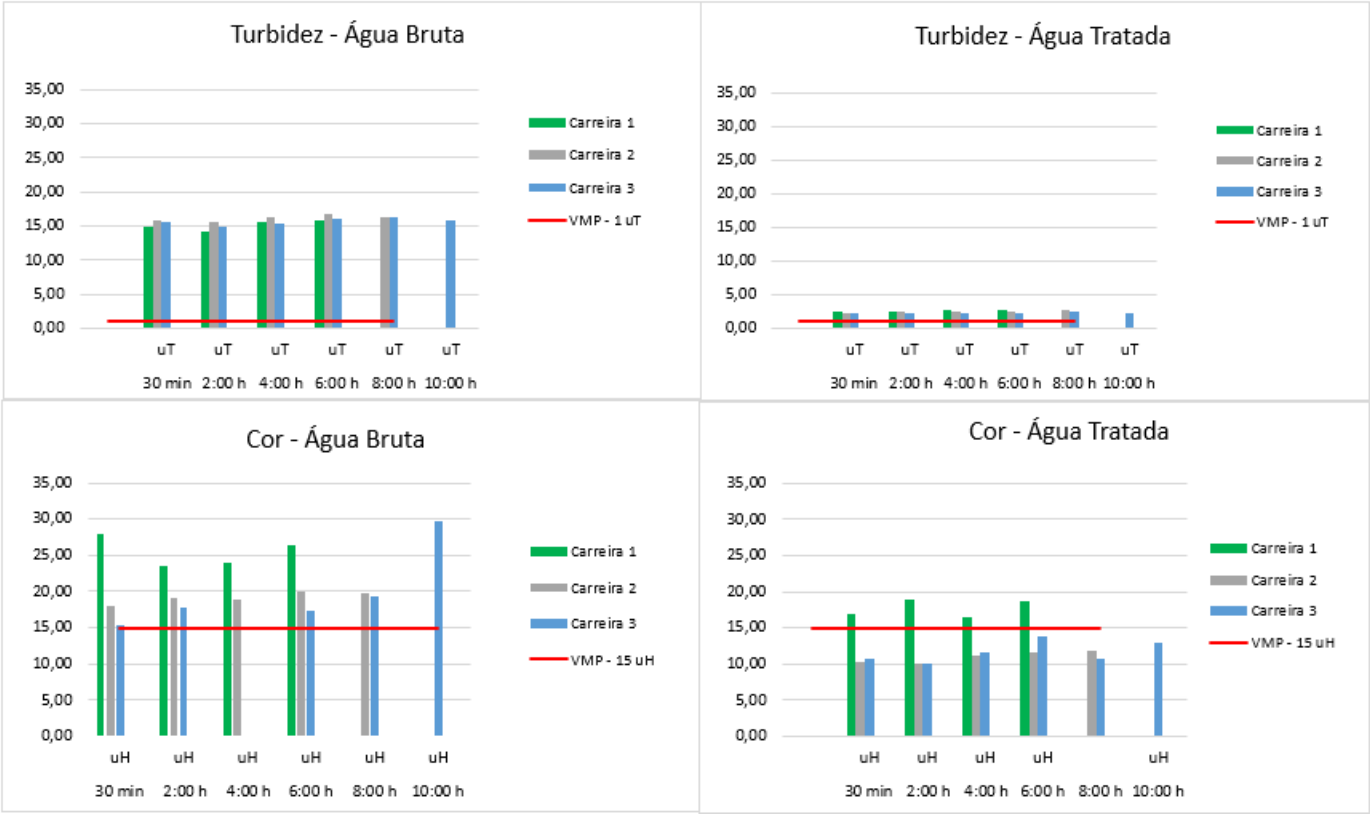
Ademais, a cor da água em sistemas públicos de abastecimento é um fator visualmente indesejável. Dessa forma, a avaliação desse parâmetro é crucial, pois uma coloração elevada pode comprometer a qualidade estética da água e levar os consumidores a buscarem fontes alternativas de abastecimento, que podem ser

inadequadas e representar riscos à saúde (Araújo; Andrade, 2020). As análises realizadas para o parâmetro cor identificaram valores superiores ao limite de potabilidade de 15 uH, estabelecido pela portaria vigente.

Nessa perspetiva, o menor valor registrado na água bruta foi de 15,4 uH, observado após 30 minutos do início da operação da carreira de filtração 3, enquanto o maior valor, de 29,7 uH identificado após 10 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 10,1 uH, observado após 2 horas de funcionamento nas carreiras de filtração 2 e 3. Já o maior valor foi de 18,8 uH verificado na carreira de filtração 1, após 2 horas de operação. Portanto, embora o processo de filtração simples com areia tenha atendido ao padrão de potabilidade para o parâmetro cor nas carreiras de filtração 2 e 3, ele não se mostrou eficaz na remoção da cor na carreira de filtração 1.

A Figura 11, apresenta as concentrações dos parâmetros cor e turbidez, tanto da água bruta como  da água tratada no processo de filtração simples com areia.

Figura 11: Resultados da filtração simples com areia na remoção de cor e turbidez

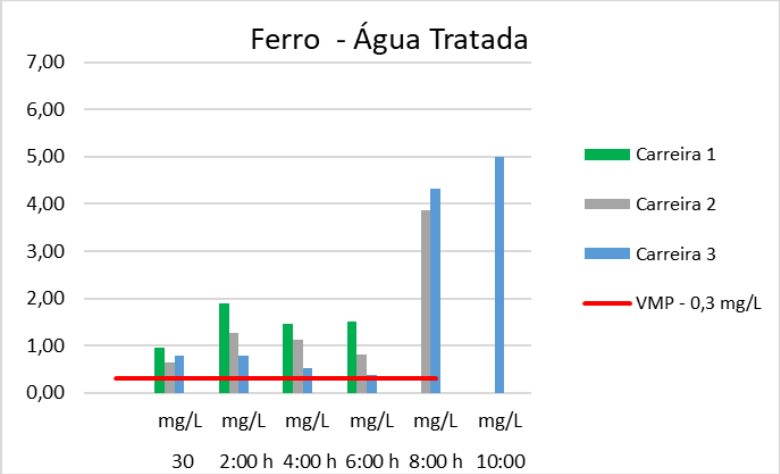



Fonte: Autoria (2025)

Com relação ao parâmetro ferro, este apresentou uma redução significativa após a passagem pelo sistema de filtração nas primeiras 6 horas de funcionamento

de ambas as carreiras de filtração. No entanto, essa redução não foi suficiente para atender ao limite máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela Portaria 888. Sendo que, o menor valor registrado foi de 0,39 mg/L, observado após 6 horas de funcionamento na carreira 3 e o maior valor foi de 5 mg/L, verificado na mesma carreira após 10 horas de operação. A Figura 12 evidencia as concentrações do parâmetro ferro.

Figura 12: Resultados da simples com areia na remoção de ferro




Fonte: Autoria (2025)

Percebe-se que a utilização de areia como leito filtrante na filtração simples, embora inicialmente remova o ferro da água, não se mostra eficiente ao longo do tempo, haja vista que com o passar das horas, não apenas ocorre a passagem do ferro da água bruta, mas também o desprendimento do ferro acumulado que havia sido retido. Assim, embora a areia tenha alcançado significativa eficiência na remoção de ferro até 6 horas de funcionamento do filtro, seu uso isolado não foi suficiente para atender ao padrão de potabilidade. Diante dos resultados, fica evidente a necessidade do processo de oxidação do ferro, seguido pela filtração do precipitado formado, conforme afirmam Moruzzi e Reali (2012).

### 5.4.3 Eficiência da Oxidação seguida da Filtração com Areia

A eficiência da areia foi reavaliada, desta vez considerando a oxidação com cloro antes da filtração, mantendo as características da filtração simples. Para isso, foram realizadas quatro carreiras de filtração com durações de 6, 8, 10 e 10 horas, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os resultados das análises realizadas nas amostras de água coletadas, incluindo os parâmetros de turbidez, cor, teor de ferro, pH e temperatura, com avaliações efetuadas tanto na água bruta quanto na tratada. Já a

Tabela 6 apresenta os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância dos parâmetros turbidez, cor, cloro, ferro, pH e temperatura, avaliados tanto na água bruta quanto na água tratada.

De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, a concentração de cloro residual livre na água deve estar entre 0,2 mg/L e 5 mg/L. Adicionalmente, conforme afirma Moruzzi e Reali (2012), para oxidar o ferro ferroso ($Fe^{2+}$), são necessários 0,64 mg/L de cloro por mg/L de ferro. Assim, considerando uma concentração de 5 mg/L de ferro na água bruta, estima-se que 3,2 mg/L de cloro sejam suficientes para oxidá-lo a hidróxido férrico, facilitando sua remoção nos processos de tratamento.

A oxidação foi realizada por meio da dosagem manual de cloro em pastilhas, com ajuste inicial mantido durante a filtração. Contudo, oscilações nas concentrações de cloro na água bruta foram observadas ao longo do processo, impossibilitando uma dosagem contínua e estável. Essas variações provavelmente ocorreram devido à dissolução irregular das pastilhas em diferentes momentos da operação.

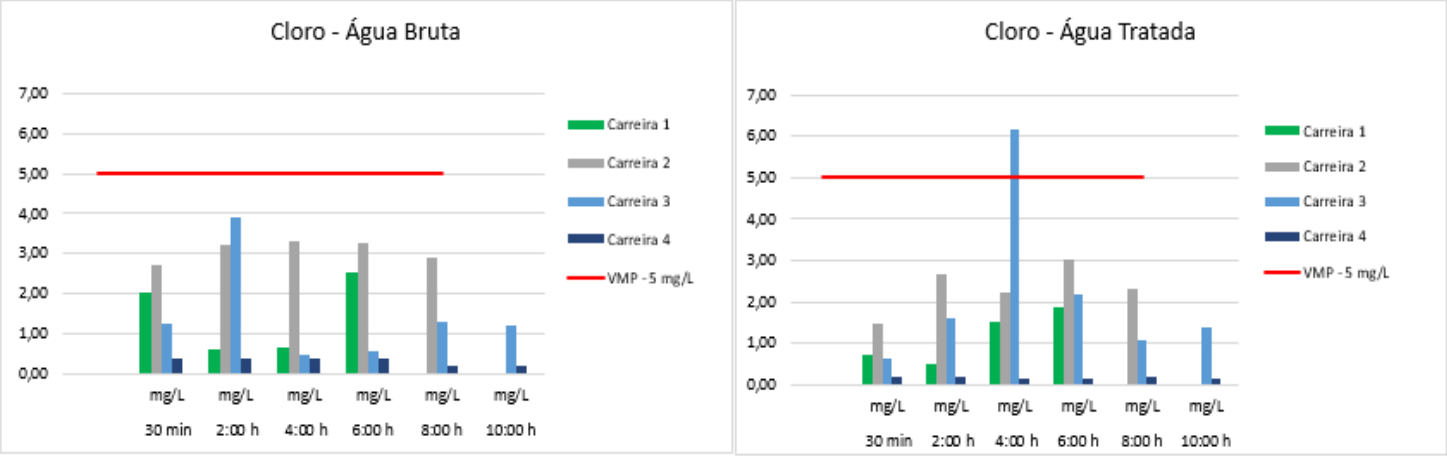
Nessa perspetiva, o menor valor registrado na água bruta foi de 0,18 mg/L, observado após 10 horas do início da operação da carreira 4, enquanto o maior valor, de 3,93 mg/L identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0,15 mg/L, observado após 4 horas de funcionamento na carreira 4. Já o maior valor foi de 6,17 mg/L verificado na carreira 3, após 4 horas de operação.

Assim, após a filtração, foi observado um transpasse significativo de cloro, ou seja, uma parte do cloro não foi consumida no processo de oxidação do ferro. Este fenômeno pode estar relacionado ao tempo de contato que foi curto, haja vista que para a oxidação seja eficiente, o cloro precisa ter tempo suficiente para reagir com o ferro, convertendo-o de ferro ferroso ($Fe^{2+}$) para ferro férrico ($Fe^{3+}$), que forma o hidróxido férrico ($Fe(OH)_3$), que é então removido por filtração (Moruzzi; Reali, 2012; Maximila, 2016).

Dessa forma, quando o tempo de contato é insuficiente, o cloro não tem tempo suficiente para reagir completamente com o ferro presente na água, o que pode resultar em uma oxidação parcial. Isso pode levar à presença de ferro residual na água tratada. Apesar de a dosagem de cloro ter atendido aos limites na maioria das carreiras de filtração, na carreira 3 foi registrada uma concentração de ferro de 6,17 mg/L após 4 horas de operação, possivelmente devido ao traspasse de cloro

acumulado no meio filtrante. A Figura 13 apresenta os resultados referentes à dosagem de cloro.

Figura 13: Resultados da dosagem de cloro no processo de oxidação seguida de Filtração




Fonte: Autoria (2025)

Os resultados de turbidez da água bruta, obtidos após a adição de cloro nas quatro carreiras de filtração, indicaram valores acima do limite estabelecido para potabilidade. O menor valor registrado para turbidez foi de 24,8 uT, observado após 8 horas do início da operação da carreira de filtração 4, enquanto o maior valor foi de 31,1 uT, identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 2. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 2,8 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 1. O maior valor foi de 4,9 verificado na carreira de filtração 3, após 10 horas de operação. Embora a água tratada tenha apresentado redução nos níveis de turbidez, os valores registrados ainda excederam os padrões de potabilidade estabelecidos para a etapa de pós-filtração rápida e para o processo de pós-desinfecção.

**Tabela 5:** Resultados da Oxidação seguida de filtração, utilizando Meio Filtrante de Areia.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | | Carreira 4 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 26,8 | 25,9 | 27,3 | 26,9 | 26,7 | 31,1 | 30,7 | 30,2 | 29,8 | 30,8 | 31 | 30,4 | 27,3 | 26,7 | 30 | 27,2 | 26,2 | 27,2 | 26,8 | 24,8 | 25,6 |
| | Cor (UC) | 129 | 105 | 116 | 122 | 163 | 149 | 143 | 140 | 152 | 125 | 148 | 152 | 154 | 149 | 152 | 128 | 118 | 127 | 126 | 55,5 | 29,8 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Cloro | 2.02 | 0,59 | 0,66 | 2,53 | 2,7 | 3,22 | 3,3 | 3,27 | 2,9 | 1,26 | 3,93 | 0,48 | 0,57 | 1,3 | 1,19 | 0,35 | 0,36 | 0,35 | 0,39 | 0,19 | 0,18 |
| | pH | 7,32 | 7,33 | 7,32 | 7,34 | 7,27 | 7,31 | 7,26 | 7,25 | 7,27 | 7,32 | 7,33 | 7,33 | 7,32 | 7,39 | 7,39 | 7,27 | 7,27 | 7,26 | 7,28 | 7,26 | 7,26 |
| | Temp. (°C) | 30,4 | 31,3 | 31,7 | 29,9 | 29,1 | 30,5 | 31 | 31,4 | 31,4 | 29,4 | 30,6 | 28,7 | 30,3 | 29,7 | 29,6 | 30,1 | 31,2 | 32,2 | 33,1 | 33,2 | 32,7 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | | Carreira 4 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 2,8 | 3,69 | 3,95 | 4,65 | 3 | 3,14 | 3,46 | 3,56 | 4,37 | 3,87 | 3,92 | 3,15 | 3,21 | 4,56 | 4,9 | 2,38 | 2,38 | 2,41 | 2,46 | 2,5 | 2,54 |
| | Cor (UC) | 15,8 | 12,2 | 17,1 | 15,5 | 15,3 | 17,9 | 19,1 | 20,5 | 20,4 | 19,3 | 15,2 | 15,3 | 12,2 | 14,5 | 15,2 | 12,4 | 15,1 | 13,4 | 11,1 | 20,3 | 24,4 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 0,5 | 0,42 | 0,6 | 0,56 | 5 |
| | Cloro | 0,7 | 0,48 | 1,52 | 1,89 | 1,46 | 2,67 | 2,24 | 3,03 | 2,32 | 0,64 | 1,6 | 6,17 | 2,19 | 1,08 | 1,39 | 0,2 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,17 | 0,16 |
| | pH | 7,47 | 7,45 | 7,38 | 7,42 | 7,48 | 7,47 | 7,31 | 7,32 | 7,47 | 7,46 | 7,42 | 7,44 | 7,37 | 7,44 | 7,43 | 7,27 | 7,29 | 7,3 | 7,29 | 7,32 | 7,3 |
| | Temp. (°C) | 30,6 | 31,4 | 31,9 | 30,1 | 29,1 | 30,6 | 31,3 | 31,7 | 31,8 | 29,8 | 30,5 | 29,4 | 30,7 | 29,6 | 29,6 | 30,1 | 31,2 | 32,8 | 33,4 | 33,4 | 32,9 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

**Tabela 6:** Resultados da Oxidação seguida de filtração, utilizando Meio Filtrante de Areia.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | Carreira 4 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | **Turbidez (UT)** | 25,9 | 27,3 | 26,73 | 0,59 | 0,35 | 26,7 | 31,1 | 29,69 | 1,77 | 3,12 | 26,7 | 31 | 29,4 | 1,88 | 3,53 | 24,8 | 27,2 | 26,3 | 0,96 | 0,92 |
| | **Cor (UC)** | 105 | 129 | 118 | 10,2 | 103 | 140 | 163 | 149,4 | 8,96 | 80,3 | 125 | 154 | 147 | 10,8 | 117 | 29,8 | 128 | 97,4 | 43,3 | 1876 |
| | **Cloro** | 0,59 | 2,53 | 1,26 | 1,1 | 1,21 | 2,7 | 3,3 | 3,08 | 0,26 | 0,07 | 0,48 | 3,93 | 1,46 | 1,26 | 1,6 | 0,18 | 0,39 | 0,3 | 0,09 | 0,01 |
| | **Ferro (mg/L)** | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | **pH** | 7,32 | 7,34 | 7,33 | 0,01 | 0 | 7,25 | 7,31 | 7,27 | 0,02 | 0 | 7,32 | 7,39 | 7,35 | 0,03 | 0 | 7,26 | 7,28 | 7,27 | 0,01 | 0 |
| | **Temp. (°C)** | 29,9 | 31,7 | 30,83 | 0,82 | 0,68 | 29,1 | 31,4 | 30,7 | 0,96 | 0,92 | 28,7 | 30,6 | 29,7 | 0,67 | 0,45 | 30,1 | 33,2 | 32,1 | 1,22 | 1,48 |
| | **Duração (h)** | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | 10 | | | | |
| | **Parâmetro** | **Carreira 1** | | | | | **Carreira 2** | | | | | **Carreira 3** | | | | | **Carreira 4** | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | **Turbidez (UT)** | 2,8 | 4,65 | 3,77 | 0,76 | 0,58 | 3 | 4,37 | 3,51 | 0,53 | 0,29 | 3,15 | 4,9 | 3,94 | 0,7 | 0,49 | 2,38 | 2,54 | 2,45 | 0,07 | 2,38 |
| | **Cor (UC)** | 12,2 | 17,1 | 15,15 | 2,09 | 4,35 | 15,3 | 20,5 | 18,64 | 2,15 | 4,62 | 12,2 | 19,3 | 15,3 | 2,29 | 5,25 | 11,1 | 24,4 | 16,1 | 5,17 | 26,7 |
| | **Cloro** | 0,48 | 1,89 | 1,15 | 0,67 | 0,45 | 1,46 | 3,03 | 2,34 | 0,59 | 0,34 | 0,64 | 6,17 | 2,18 | 2,02 | 4,09 | 0,08 | 5 | 1,19 | 1,87 | 3,51 |
| | **Ferro (mg/L)** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,08 | 5 | 1,19 | 1,87 | 3,51 |
| | **pH** | 7,38 | 7,47 | 7,43 | 0,04 | 0 | 7,31 | 7,48 | 7,41 | 0,09 | 0,01 | 7,37 | 7,46 | 7,43 | 0,03 | 0 | 7,27 | 7,32 | 7,3 | 0,02 | 0 |
| | **Temp. (°C)** | 30,1 | 31,9 | 31 | 0,8 | 0,65 | 29,1 | 31,8 | 30,9 | 1,11 | 1,24 | 29,4 | 30,7 | 29,9 | 0,54 | 0,29 | 30,1 | 33,4 | 32,3 | 1,35 | 1,82 |
| | **Duração (h)** | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | 10 | | | | |

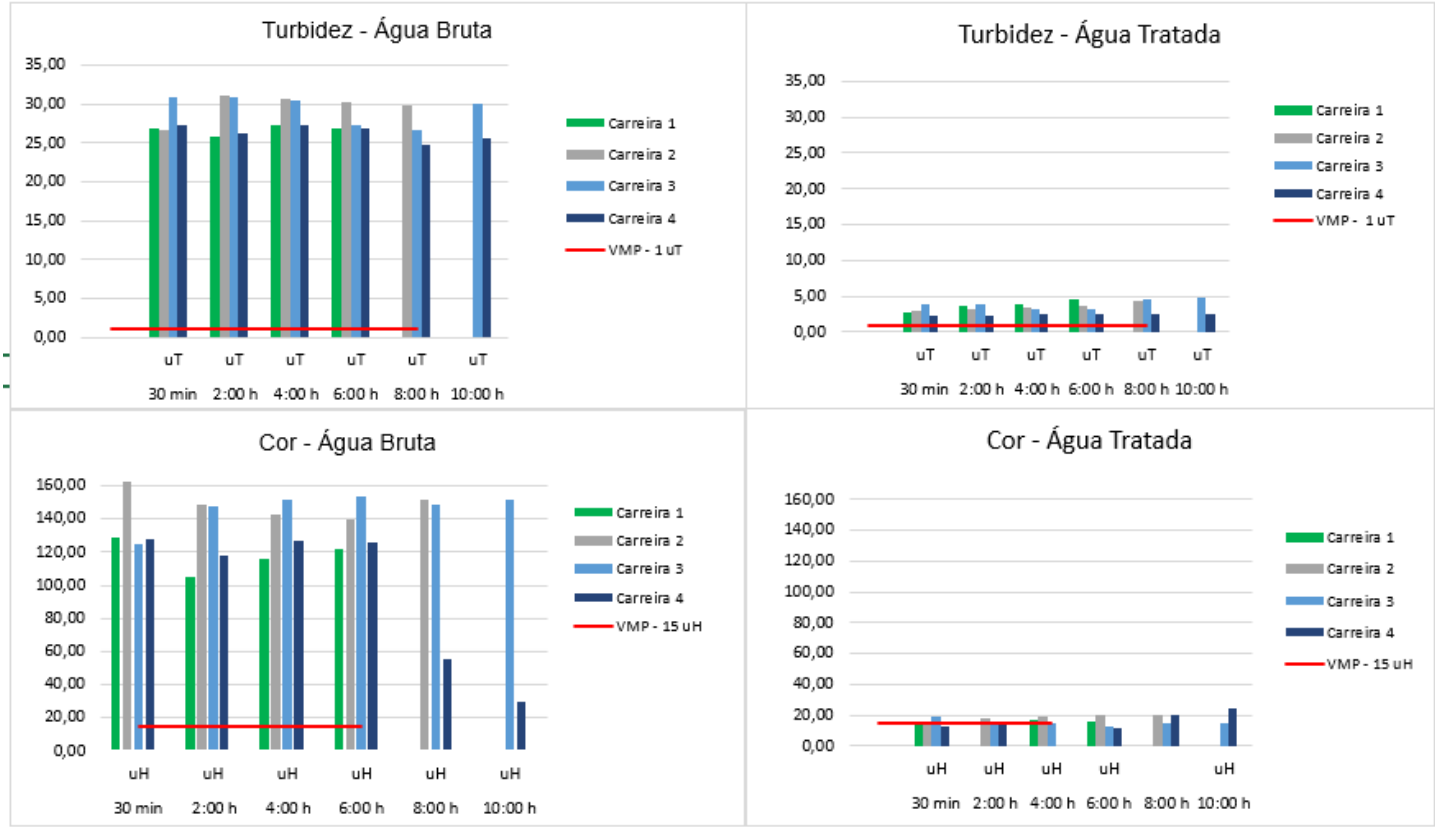
Fonte: Autoria (2025)

.

Do mesmo modo, as análises do parâmetro cor revelaram valores acima do limite de potabilidade de 15 uH, definido pela portaria vigente, tanto na água bruta quanto na água tratada. O menor valor registrado na água bruta foi de 29,8 uH, observado após 10 horas de operação da carreira de filtração 4, enquanto o maior valor, de 163 uH identificado após 30 minutos de funcionamento do filtro na carreira de filtração 2. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 11,1 uH, observado após 6 horas da carreira de filtração 4 e o valor máximo foi de 24,4 uH, verificado também na carreira de filtração 4, após 10 horas de operação.

Em relação aos parâmetros de pH e temperatura não foram verificadas grandes variações entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,25 a 7,35 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,27 e 7,48, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 888. Já a temperatura variou de 28,7°C a 33,2°C na água bruta e de 29,1°C a 33,4°C na água tratada. A Figura 14, apresenta as concentrações dos parâmetros cor e turbidez, tanto da água bruta como  da água tratada no processo de oxidação seguinda da filtração com areia.

Figura 14: Resultados da oxidação seguida de filtração com areia na remoção de cor e turbidez



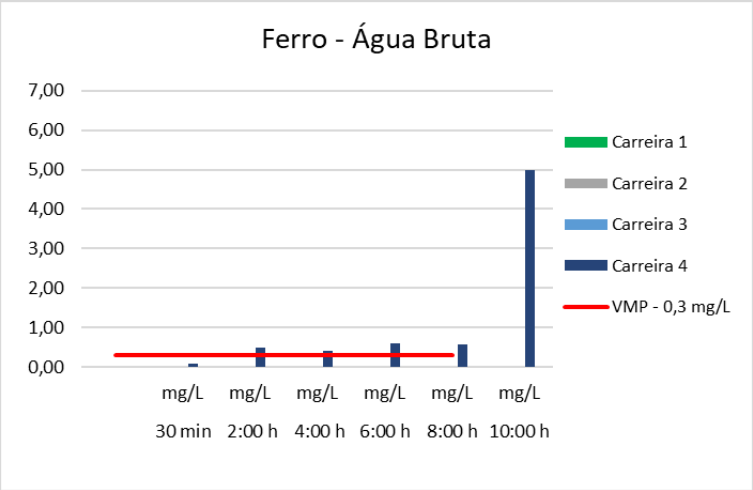

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Referente ao parâmetro ferro, este apresentou uma eficiência de 100%, após a passagem pelo sistema de filtração nas carreiras de filtração 1, 2 e 3. No entanto, na carreira de filtração 4, apesar de reduzir significativamente o teor de ferro, essa redução não foi suficiente para atender ao limite máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela Portaria 888. O menor valor registrado na carreira 4 foi de 0,08 mg/L, observado após 30 minutos de funcionamento. Já o maior valor foi de 5 mg/L, verificado após 10 horas de operação, o aumento no transpasse de ferro pode ser explicado devido a sobrecarga do sistema na retenção de impurezas.

Além disso, o traspasse de ferro na carreira 4 pode ser explicado devido ao baixo teor de cloro observado nesta carreira, em média 0,30 mg/L, um valor significativamente abaixo do estipulado (3,2 mg/L) para o processo de oxidação do ferro. Assim, na carreira de filtração 4 a dosagem de cloro não foi suficiente para realizar a oxidação completa do ferro, comprometendo assim a eficiência do processo.

A Figura 15 evidência os resultados referente ao teor de ferro após passar pela filtração.

Figura 15: Resultados da oxidação seguida de filtração, com Areia na remoção de ferro




Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

### 5.4.4 Eficiência da Filtração Simples com Antracito

Posteriormente, a eficiência da filtração simples foi avaliada utilizando o antracito como meio filtrante, de granulometria entre 0,9 e 1,0 mm, sendo realizadas três carreiras de filtração com durações de 6, 8, 10 horas, respectivamente.

Segundo Wichtmann *et al*. (2019), o antracito é amplamente utilizado em sistemas de filtração de água devido à sua elevada porosidade, que favorece o fluxo hidráulico e reduz as perdas de carga no leito filtrante. Além disso, sua superfíci

irregular e angular proporciona maior área de contato com a água, otimizando a retenção de partículas suspensas e contaminantes.

A Tabela 7 sintetiza os resultados das análises físico-químicas realizadas nas amostras de água coletadas, abrangendo os parâmetros de turbidez, cor, concentração de ferro, pH e temperatura, avaliados nas condições de água bruta e tratada.

**Tabela 7:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Antracito.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 15,4 | 16,7 | 15,8 | 16,5 | 15,6 | 16,7 | 14,9 | 15,2 | 16,6 | 17,9 | 15,8 | 15,9 | 16,8 | 17,2 | 16,3 |
| | Cor (UC) | 18,2 | 21,7 | 21,4 | 19,5 | 20,8 | 18,1 | 20,2 | 16,3 | 19,4 | 19,2 | 21,4 | 19,9 | 20,6 | 20,2 | 21,4 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | pH | 7,35 | 7,35 | 7,32 | 7,35 | 7,39 | 7,38 | 7,36 | 7,35 | 7,35 | 7,38 | 7,36 | 7,35 | 7,36 | 7,34 | 7,34 |
| | Temp. (°C) | 27,4 | 27,6 | 28,4 | 28,8 | 26,9 | 28,2 | 29,2 | 30,3 | 29,8 | 27,9 | 28,1 | 29,4 | 29,9 | 30,2 | 29,8 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0,68 | 1,08 | 1,14 | 1,26 | 0,98 | 1,03 | 1,17 | 1,19 | 1,24 | 1,62 | 1,54 | 1,48 | 1,77 | 1,72 | 1,68 |
| | Cor (UC) | 4,7 | 4,6 | 5,2 | 5,8 | 5,2 | 4,3 | 4,6 | 5,4 | 5,8 | 5,6 | 4,8 | 4,2 | 5,4 | 6,2 | 5,79 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,77 | 7,69 | 7,75 | 7,76 | 7,77 | 7,73 | 7,82 | 7,86 | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,78 |
| | Temp. (°C) | 27,7 | 27,9 | 28,5 | 28,7 | 26,7 | 27,9 | 29,2 | 29,5 | 30,2 | 27,6 | 27,9 | 29,1 | 29,6 | 29,7 | 29,2 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 8, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância de turbidez, cor, ferro, temperatura e pH, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

**Tabela 8:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Antracito.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 15,4 | 16,7 | 16,1 | 0,61 | 0,37 | 14,9 | 16,7 | 15,8 | 0,82 | 0,67 | 15,8 | 17,9 | 16,7 | 0,81 | 0,66 |
| | Cor (UC) | 18,2 | 21,7 | 20,2 | 1,65 | 2,73 | 16,3 | 20,8 | 19 | 1,8 | 3,23 | 19,2 | 21,4 | 20,5 | 0,87 | 0,75 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **pH** | 7,32 | 7,35 | 7,34 | 0,01 | 0 | 7,35 | 7,39 | 7,37 | 0,02 | 0 | 7,34 | 7,38 | 7,36 | 0,02 | 0 |
| | **Temp. (°C)** | 27,4 | 28,8 | 28,1 | 0,66 | 0,44 | 26,9 | 30,3 | 28,9 | 1,36 | 1,84 | 27,9 | 30,2 | 29,2 | 0,98 | 0,96 |
| | **Duração (h)** | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |
| **Água Tratada** | **Parâmetro** | **Carreira 1** | | | | | **Carreira 2** | | | | | **Carreira 3** | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| | **Turbidez (UT)** | 0,68 | 1,26 | 1,04 | 0,25 | 0,06 | 0,98 | 1,24 | 1,12 | 0,11 | 0,01 | 1,48 | 1,77 | 1,64 | 0,11 | 0,01 |
| | **Cor (UC)** | 4,6 | 5,8 | 5,08 | 0,55 | 0,3 | 4,3 | 5,8 | 5,06 | 0,61 | 0,37 | 4,2 | 6,2 | 5,33 | 0,72 | 0,52 |
| | **Ferro (mg/L)** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | **pH** | 7,76 | 7,78 | 7,77 | 0,01 | 0 | 7,69 | 7,77 | 7,74 | 0,03 | 0 | 7,76 | 7,86 | 7,8 | 0,04 | 0 |
| | **Temp. (°C)** | 27,7 | 28,7 | 28,2 | 0,48 | 0,23 | 26,7 | 30,2 | 28,7 | 1,39 | 1,95 | 27,6 | 29,7 | 28,9 | 0,89 | 0,79 |
| | **Duração (h)** | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |

Fonte: Autoria (2025).

No que se refere aos resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram, na maioria dos casos, valores de turbidez acima do padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888. O menor valor registrado foi de 14,9 uT, observado após 4 horas do início da operação da carreira de filtração 2, enquanto o maior valor foi de 17,9 uT, identificado após 4 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0,68 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 1. O maior valor foi de 1,77 verificado na carreira de filtração 3, após 6 horas de operação. Apesar da redução nos níveis de turbidez após o tratamento, os valores observados ainda ultrapassaram os limites de potabilidade estabelecidos para sistemas com filtração rápida.

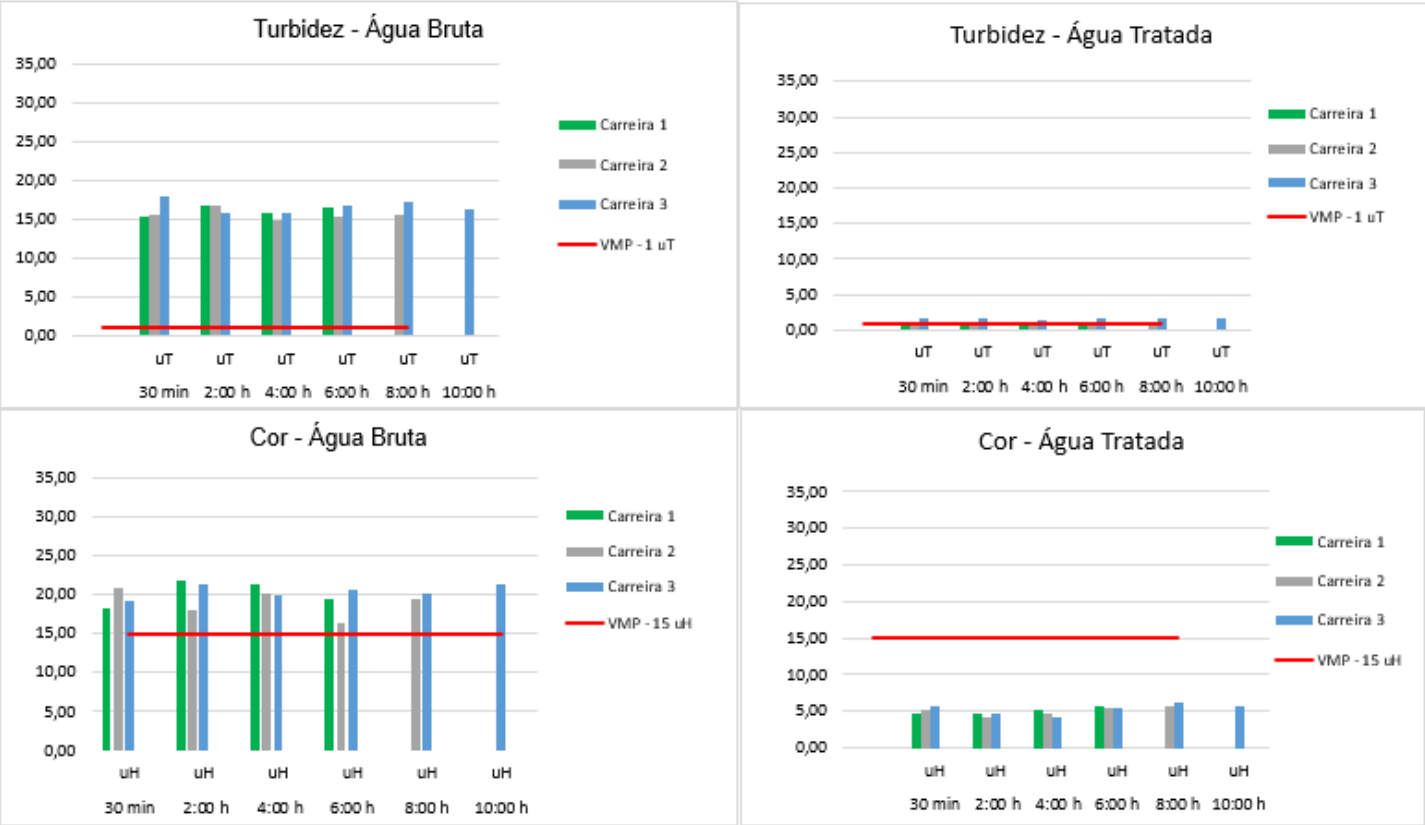
As análises referentes ao parâmetro de cor indicaram valores acima do limite de potabilidade de 15 uH, conforme estabelecido pela portaria vigente para água bruta. Por outro lado, após a passagem pelo sistema de filtração, a água atendeu aos requisitos da portaria.

Assim, o menor valor registrado na água bruta foi de 16,3 uH, observado após 6 horas de operação da carreira 2, enquanto o maior valor, de 21,7 uH identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira 1. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 4,2 uH, observado após 4 horas da carreira 3. O maior valor foi de 6,2 uH verificado nas carreiras de filtração 3, após 8 horas.

Em relação a determinação dos parâmetros de pH e temperatura não apresentou grandes variações entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,32 a 7,39 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água

tratada os valores oscilaram entre 7,69 e 7,86, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 888. Já a temperatura variou de 26,9°C a 30,3°C na água bruta e de 26,7°C a 30,2°C na água tratada. A Figura 16 evidência os resultados obtidos para a turbidez e cor.

Figura 16: Resultados da filtração simples com antracito, na remoção de cor e turbidez




Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Referente ao parâmetro ferro, este apresentou eficiência de 100% nas carreiras 1, 2 e 3 após a passagem pelo sistema de filtração ao longo da operação do sistema.

### 5.4.4 Eficiência da Filtração Simples com Zeólita

Por fim, a eficiência da filtração simples foi avaliada utilizando a zeólita (OXTECH-ZT) como meio filtrante, com granulometria classificada entre 0,4 e 1,2 mm, sendo realizadas três carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, respectivamente.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados das análises das amostras de água obtidas após cada coleta, considerando os parâmetros de turbidez, cor, teor de ferro, pH e temperatura, analisados em ambas as condições: água bruta e água tratada.

**Tabela 9:** Resultados da filtração simples com zeólita.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 13,9 | 14,1 | 14,4 | 13,8 | 16,2 | 15,8 | 15,7 | 16,6 | 14,9 | 17,2 | 17,8 | 16,9 | 17,3 | 16,2 | 16,5 |
| | Cor (UC) | 19,8 | 20,3 | 19,5 | 19,8 | 21 | 22,1 | 19,8 | 22,9 | 20,4 | 19,8 | 17,7 | 18,3 | 19,6 | 20,1 | 19,7 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | pH | 7,36 | 7,36 | 7,32 | 7,34 | 7,4 | 7,38 | 7,36 | 7,36 | 7,38 | 7,38 | 7,38 | 7,35 | 7,36 | 7,36 | 7,34 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 28,3 | 29,2 | 29,7 | 27,8 | 28,2 | 29,2 | 29,8 | 30,1 | 27,6 | 28,5 | 29,3 | 29,8 | 30,2 | 29,8 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0 | 0,02 | 0 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,05 |
| | Cor (UC) | 0,68 | 1 | 1,04 | 1,2 | 1,15 | 1,06 | 1,32 | 1,23 | 1,18 | 0,94 | 1,3 | 1,28 | 1,32 | 1,24 | 1,36 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 8,18 | 8,1 | 7,98 | 7,87 | 8,69 | 7,9 | 7,76 | 7,77 | 7,73 | 8,32 | 7,96 | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,78 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 28,3 | 28,7 | 29,2 | 26,9 | 27,5 | 29,4 | 29,8 | 30,2 | 27,4 | 27,9 | 29,3 | 29,8 | 29,9 | 30,2 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 10, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância de turbidez, cor, ferro, temperatura e pH, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

Os resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram, valores de turbidez acima do padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888. O menor valor registrado foi de 13,8 uT, observado após horas do início da operação da carreira de filtração 1, enquanto o maior valor foi de 17,8 uT, identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 1. O maior valor foi de 0,07 verificado nas carreiras de filtração 2 e 3, após 8 e 6 horas, respectivamente. Portanto, a zeólita, utilizada como meio filtrante, promoveu a redução dos níveis de turbidez na etapa de pós-filtração rápida, atendendo aos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Do mesmo modo, as análises do parâmetro cor revelaram valores acima do limite de potabilidade de 15 uH, definido pela portaria vigente para água bruta. Após passar pelo filtro, a água atendeu aos requisitos da portaria.

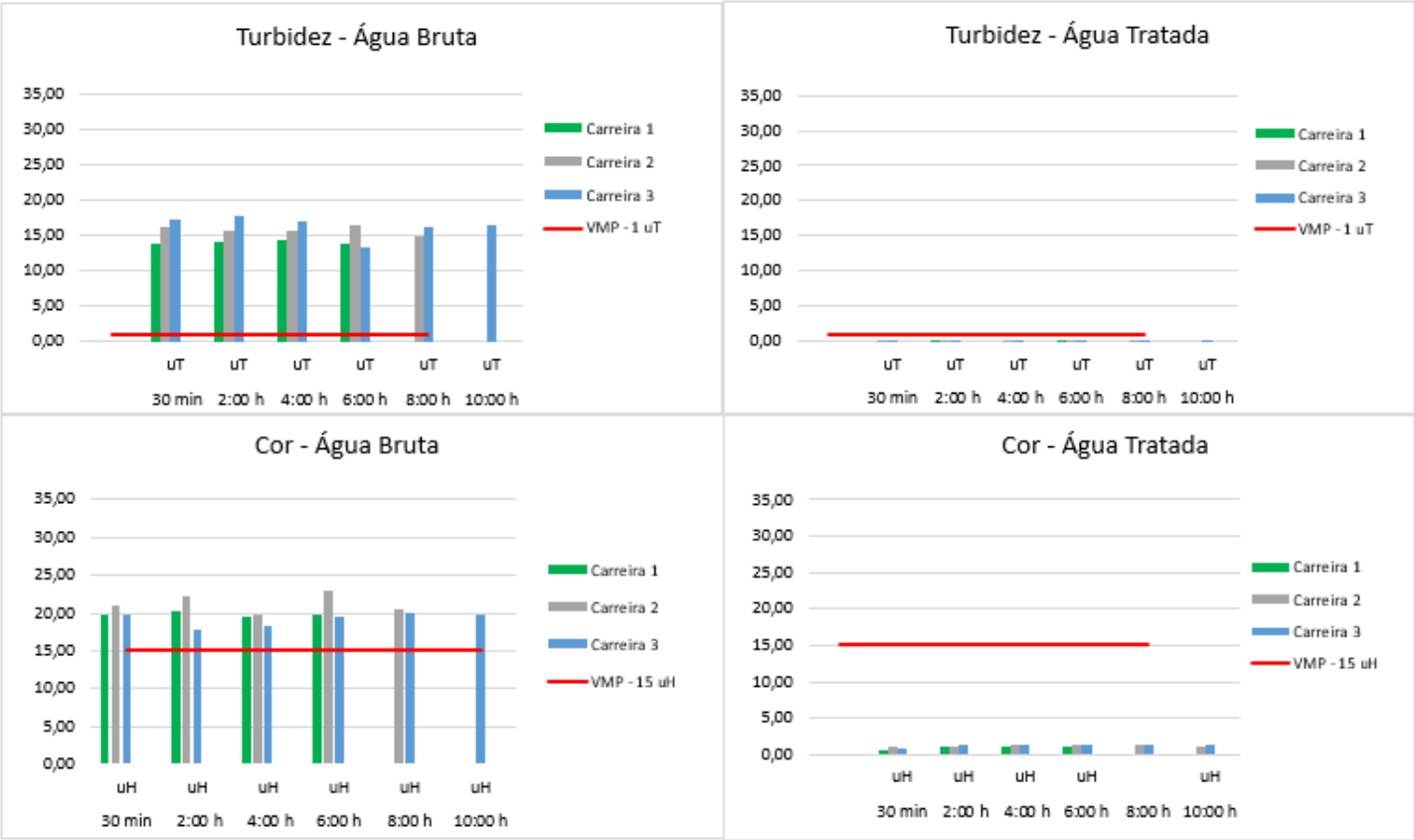
**Tabela 10:** Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Zeólita.

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 13,8 | 14,4 | 14,1 | 0,26 | 0,07 | 14,9 | 16,6 | 15,8 | 0,63 | 0,4 | 16,2 | 17,8 | 16,98 | 0,58 | 0,33 |
| | Cor (UC) | 19,5 | 20,3 | 19,9 | 0,33 | 0,11 | 19,8 | 22,9 | 21,2 | 1,26 | 1,58 | 17,7 | 20,1 | 19,2 | 0,96 | 0,93 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | pH | 7,32 | 7,36 | 7,35 | 0,02 | 0 | 7,36 | 7,4 | 7,38 | 0,02 | 0 | 7,34 | 7,38 | 7,36 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 29,7 | 28,7 | 0,93 | 0,87 | 27,8 | 30,1 | 29 | 1 | 0,99 | 27,6 | 30,2 | 29,2 | 0,98 | 0,96 |
| | Duração (h) | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,03 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0 |
| | Cor (UC) | 0,68 | 1,2 | 0,98 | 0,22 | 0,05 | 1,06 | 1,32 | 1,19 | 0,1 | 0,01 | 0,94 | 1,36 | 1,24 | 0,15 | 0,02 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 7,87 | 8,18 | 8,03 | 0,14 | 0,02 | 7,73 | 8,69 | 7,97 | 0,41 | 0,17 | 7,76 | 8,32 | 7,9 | 0,22 | 0,05 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 29,2 | 28,5 | 0,68 | 0,46 | 26,9 | 30,2 | 28,8 | 1,47 | 2,15 | 27,4 | 30,2 | 29,08 | 1,16 | 1,34 |
| | Duração (h) | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Assim, o menor valor registrado na água bruta foi de 17,7 uH, observado após 2 horas de operação da carreira 3, enquanto o maior valor, de 22,4 uH identificado após 6 horas de funcionamento do filtro na carreira 2. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0,68 uH, observado após 30 minutos da carreira 4. O maior valor foi de 1,36 uH verificado na carreira 3, após 10 horas de operação, resultados os quais atendem aos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria. A Figura 17 evidência os resultados obtidos para a turbidez e cor.

Figura 17: Resultados da filtração simples com zeólita na remoção de cor e turbidez




Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Em relação a determinação dos parâmetros de pH apresentou variações entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,32 a 7,40 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,73 e 8,69. É possível verificar que a zeólita influencia a alcalinidade da água, tornando-a ligeiramente mais básica. Apesar disso o pH se mantém dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 888. Já a temperatura variou de 27,6°C a 30,2°C na água bruta e de 26,9°C a 30,2°C na água tratada.

Em relação ao parâmetro ferro, este obteve eficiência de 100% ao longo das carreiras 1, 2 e 3 após a passar pelo sistema de filtração.

Dessa forma, a zeólita foi o meio filtrante que apresentou os melhores resultados em conformidade com os VPM estabelecidos pela Portaria n° 888/2021. Trata-se de um material adsorvente muito utilizado como meio filtrante na retirada de íons metálicos para a tratamento de água, uma vez que tem a habilidade de troca iônica com a água, favorecendo a retenção de metais pesados como íons de ferro, uma vez que a estrutura porosa das zeólitas permite uma alta capacidade de

adsorção, capturando eficientemente íons metálicos e outros contaminantes (Vistuba, 2010; Paz, 2016; Mubarak *et al*., 2021).

### 5.4.5 Análise da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes

Na Tabela 11, é apresento a eficiência dos diferentes meios filtrantes na remoção de turbidez, cor e ferro, avaliados 30 minutos após o início da operação do filtro e a cada 2 horas durante a filtração. Além disso, são apresentadas as eficiências médias alcançadas para cada parâmetro.

Na filtração simples com areia, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 82,41% (após 2h da carreira 1) e 85,96% (após 30 min da carreira 3). Quanto à cor, os valores oscilaram entre 20,23% (6 h, carreira 3) e 56,56% (10 h, carreira 3). Já para o ferro, a eficiência mínima foi de 0% (10 h, carreira 3) e a máxima de 92,20% (6 h, carreira 3). A redução na remoção de ferro ao longo do tempo indica saturação do meio filtrante, evidenciando a necessidade de retrolavagem periódica.

Na etapa de oxidação seguida de filtração com areia, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 82,71% (6h, carreira 1) e 91,25% (30 min, carreira 4). Para a cor, os valores oscilaram de 18,12% (10h, carreira 4) a 92,07% (6h, carreira 3). Na remoção de ferro, a eficiência foi de 100% nas carreiras 1, 2 e 3, mas caiu para 0% na carreira 4 (10h), devido à redução do teor de cloro, comprometendo a oxidação do ferro e favorecendo seu transpasse.

Na etapa de filtração simples com antracito, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 89,46% (6h, carreira 3) e 95,58% (30 min, carreira 1). Para a cor, os valores oscilaram de 66,87% (8h, carreira 2) a 78,89% (4h, carreira 3). Na remoção de ferro, a eficiência foi de 100% em ambas as carreiras.

Na etapa de filtração simples com zeólita, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 99,53% (8h, carreira 2) e 100% (30 min e 6 h, carreira 1). Para a cor, os valores oscilaram de 92,65% (2h, carreira 3) a 96,56% (30 min, carreira 1). Na remoção de ferro, a eficiência foi de 100% em ambas as carreiras.

**Tabela 11:** Resultados da da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes.

| Parâmetro | Carreiras de Filtração (Ef %) | Filtração Simples + Areia | | | | | | | Oxidação + Filtração + Areia | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | Ef % (Méd.) | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | Ef % (Méd.) |
| Turbidez | Carreira 1 | 83,55 | 82,41 | 82,75 | 82,89 | - | - | 82,9 | 89,6 | 85,8 | 85,53 | 82,7 | - | - | 85,88 |
| | Carreira 2 | 85,18 | 84,51 | 85,3 | 85,08 | 84,08 | - | 84,83 | 88,7 | 89,9 | 88,72 | 88,2 | 85,3 | - | 88,18 |
| | Carreira 3 | 85,96 | 84,72 | 85,16 | 85,46 | 85,39 | 85,59 | 85,38 | 87,4 | 87,4 | 89,63 | 88,3 | 82,9 | 83,7 | 86,53 |
| | Carreira 4 | - | - | - | - | - | - | - | 91,3 | 90,9 | 91,13 | 90,8 | 89,9 | 90,1 | 90,68 |
| Cor | Carreira 1 | 39,42 | 20,33 | 31,38 | 29,27 | - | - | 30,1 | 87,8 | 88,4 | 85,25 | 87,3 | - | - | 87,16 |
| | Carreira 2 | 43,09 | 47,39 | 40,42 | 42 | 40,1 | - | 42,6 | 90,6 | 88 | 86,64 | 85,4 | 86,6 | - | 87,43 |
| | Carreira 3 | 31,16 | 43,25 | 30,12 | 20,23 | 44,04 | 56,56 | 37,56 | 84,6 | 89,7 | 89,93 | 92,1 | 90,3 | 90 | 89,42 |
| | Carreira 4 | - | - | - | - | - | - | - | 90,3 | 87,2 | 89,44 | 91,2 | 63,4 | 18,1 | 73,28 |
| Ferro | Carreira 1 | 80,8 | 62 | 70,6 | 70 | - | - | 70,85 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - | 100 |
| | Carreira 2 | 87 | 74,6 | 77,6 | 83,8 | 22,6 | - | 69,12 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | 100 |
| | Carreira 3 | 84 | 84 | 89,4 | 92,2 | 13,4 | 0 | 60,5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | Carreira 4 | - | - | - | - | - | - | - | 98,4 | 90 | 91,6 | 88 | 88,8 | 0 | 76,13 |

| Parâmetro | Carreiras de Filtração (Ef %) | Filtração Simples + Antracito | | | | | | | Filtração Simples + Zeólita | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | Ef % (Méd.) | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | Ef % (Méd.) |
| Turbidez | Carreira 1 | 95,58 | 93,53 | 92,78 | 92,36 | - | - | 93,56 | 100 | 99,9 | 100 | 99,7 | - | - | 99.89 |
| | Carreira 2 | 93,71 | 93,83 | 92,14 | 92,17 | 92,53 | - | 92,87 | 99,8 | 99,8 | 99,55 | 99,6 | 99,5 | - | 99,66 |
| | Carreira 3 | 90,94 | 90,25 | 90,69 | 89,46 | 90 | 89,69 | 90,17 | 99,9 | 99,8 | 99,76 | 99,6 | 99,7 | 99,7 | 99,73 |
| Cor | Carreira 1 | 74,17 | 78,8 | 75,7 | 70,25 | - | - | 74,73 | 96,6 | 95,1 | 94,66 | 93,9 | - | - | 95,05 |
| | Carreira 2 | 75 | 76,24 | 77,22 | 66,87 | 70,1 | - | 73,08 | 94,5 | 95,2 | 93,33 | 94,6 | 94,2 | - | 94,37 |
| | Carreira 3 | 70,83 | 77,57 | 78,89 | 73,78 | 69,3 | 72,94 | 73,88 | 95,3 | 92,7 | 93 | 93,3 | 93,8 | 93,1 | 93,51 |
| Ferro | Carreira 1 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - | 100 |
| | Carreira 2 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | 100 |
| | Carreira 3 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autoria (2025).

## 6. CONCLUSÃO

A análise comparativa dos métodos de tratamento da água: filtração simples com areia, oxidação com cloro seguida de filtração com areia, filtração simples com antracito e filtração simples com zeólita pode-se observar diferenças relevantes na eficiência de remoção de cor, turbidez e ferro.

Na remoção de turbidez, a areia apresentou o menor desempenho entre os meios filtrantes testados. Na filtração simples, obteve eficiências entre 82,41% e 85,96%, com turbidez da água tratada variando de 2,72 uT a 2,19 uT. Com a adição de pré-oxidação com cloro, a eficiência aumentou para 82,71% a 91,25%, com turbidez residual entre 4,9 uT e 2,38 uT. O antracito mostrou desempenho superior, com remoção de turbidez entre 89,46% e 95,58%, em que os valores de turbidez na água tratada variou de 1,77 uT a 0,68 uT. A zeólita apresentou os melhores resultados, com remoções de 99,68% a 99,85%, apresentando turbidez residual entre 0,00 uT e 0,07 uT. Desta forma, considerando que a Portaria nº 888 estabelece, para sistemas de abastecimento com filtração rápida, o limite máximo de 0,5 uT em 95% das amostras mensais, observa-se que apenas a zeólita atendeu ao padrão de potabilidades de remoção de turbidez.

Nos ensaios de remoção de cor aparente, os meios filtrantes apresentaram eficiências distintas. A areia teve o menor desempenho: na filtração simples, as remoções variaram de 20,23% a 56,56%, com cor residual entre 18,8 uH e 10,1 uH. Com pré-oxidação com cloro, a eficiência oscilou entre 18,12% e 92,07%, e os valores finais de cor ficaram entre 20,5 uH e 11,1 uH. O antracito demonstrou maior eficiência que a areia, com remoções de 66,87% a 78,89% e cor residual entre 6,2 uH e 4,3 uH. A zeólita novamente apresentou os melhores resultados, com remoção de cor entre 92,65% e 96,56%, e valores finais de cor entre 1,36 uH e 0,68 uH. De acordo com a Portaria nº 888/2021, que estabelece limite máximo de 15 uH para cor aparente em água destinada ao consumo humano, apenas os sistemas com filtração simples utilizando antracito e zeólita atenderam aos padrões de qualidade para esse parâmetro.

Na remoção de ferro, os métodos de tratamento apresentaram diferenças significativas de desempenho. A filtração simples com areia obteve as menores eficiências, com remoções variando de 0% a 92,2%, e concentrações residuais de ferro entre 5,0 mg/L e 0,39 mg/L, evidenciando baixa capacidade de retenção e alta

variação ao longo das carreiras de filtração. A combinação de oxidação com cloro seguida de filtração com areia mostrou-se mais eficaz: nas três primeiras carreiras, com dosagem de cloro entre 3,93 mg/L e 0,48 mg/L, a remoção foi de 100%. Contudo, na quarta carreira, com dosagens reduzidas (de 0,39 mg/L a 0,18 mg/L), a eficiência caiu, variando de 0% a 98,4%, com concentrações residuais de ferro entre 5,0 mg/L e 0,08 mg/L. Isso reforça a importância da etapa de oxidação e da determinação adequada da dosagem de cloro para sistemas com areia como meio filtrante. Por fim, a filtração simples com antracito e zeólita obteve 100% de remoção de ferro em todas as carreiras, demonstrando desempenho superior e estabilidade no tratamento.

Assim, considerando o limite máximo de 0,3 mg/L de ferro estabelecido pela Portaria nº 888, conclui-se que, nas condições avaliadas neste estudo, a filtração simples com areia não foi eficaz na remoção do ferro. Por outro lado, a oxidação com cloro, utilizando uma dosagem média de 1,26 mg/L, seguida de filtração com areia, bem como a aplicação de filtração simples com antracito ou zeólita, demonstraram ser capazes de atender aos parâmetros estabelecidos pela legislação.

No que diz respeito ao pH, observou-se que a zeólita alterou o pH da água, tornando-a ligeiramente mais básica, com valores variando entre 7,73 e 8,69. Em contrapartida, os demais métodos mantiveram o pH próximo ao da água bruta. Assim, em todos os ensaios o pH apresentou variações dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

No entanto, considerando os limites máximos permitidos para os parâmetros cor, turbidez e ferro estabelecidos pela Portaria 888, para as condições deste estudo, foi verificado que a filtração com antracito, embora tenha apresentado bons resultados para a remoção de ferro e cor, não foi eficiente para a remoção de turbidez. Já a oxidação com cloro seguida de filtração com areia se mostrou eficiente apenas para a remoção de ferro. Já a filtração simples com areia, apesar de apresentar melhorias nos parâmetros analisados, não se mostrou eficiente para produção de água tratada condizente para nem um dos parâmetros, conforme determina a legislação vigente.

Já a aplicação da filtração simples com zeólita, considerando as características da água bruta deste estudo, demonstrou ser um método eficiente na remoção de turbidez e cor, produzindo água com valores muito abaixo dos valores máximos determinados pela Legislação vigente, além de permitir a remoção completa do ferro, representando, assim, uma alternativa eficaz para o tratamento de água, considerando os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 888.

Além disso, considerando que, em nenhuma das carreiras de filtração, foi atingida a perda de carga total de 1,0 m para nenhum dos meios filtrantes, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos que acompanhem a carreira de filtração até o limite máximo de perda de carga. Isso permitirá investigar o transpasse de cor, turbidez e ferro, bem como definir com maior precisão o tempo total da carreira de filtração e, consequentemente, estabelecer parâmetros adequados para a limpeza do filtro, como o tempo de retrolavagem e o volume de água consumido.

Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de estudos envolvendo filtros de camada dupla, com diferentes combinações de meios filtrantes aplicando areia, antracito e zeólita com o objetivo de avaliar a otimização da remoção de impurezas, e o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes no tratamento de água, bem como investigar a aplicação da oxidação com cloro antes da filtração, a fim de facilitar a remoção de impurezas, sobretudo o ferro, nos processos de tratamento.

Assim, diante da crescente demanda por soluções sustentáveis e inclusivas no setor de saneamento, destaca-se a importância de fomentar pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas simplificados de tratamento de água, com o objetivo de incentivar e fortalecer alternativas coletivas e acessíveis, capazes de ampliar o acesso à água potável em comunidades vulneráveis.

Nesse contexto, torna-se imprescindível a definição de critérios e diretrizes para o monitoramento, operação e manutenção desses sistemas, assegurando sua efetividade e sustentabilidade. Tais medidas mostram-se particularmente relevantes em áreas rurais, comunidades indígenas e ribeirinhas, territórios que, em sua maioria, enfrentam dificuldades de acesso aos sistemas convencionais de abastecimento de água.

**REFERÊNCIAS**

ALMEIDA, M. C.; SILVA, M. M.; PAULA, M. Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água em relação à turbidez, cor e ph da água. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, v. 5, n. 1, p. 25- 40, 2017.

ALMEIDA, F. C. P.; MENEZES, M. A.; FACÓ, J. F. B. Desafios na gestão das águas: percepção dos gestores de uma indústria automotiva da Macrometrópole Paulista. **Research, Society and Development,** v. 9, n.2, e02921920, 2020 (CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409.

ALTAMIRA. Núcleo de Planejamento e Desenvolvimento. **PLANO MUNICIPAL INTEGRADO DE SANEAMENTO BÁSICO DE ALTAMIRA/PA – PMISB**: abastecimento de água esgotamento sanitário resíduos sólidos urbanos. Altamira, 2022. 320 p.

ALTAMIRA. **RELATÓRIO DO PLANO DIRETOR,** Volume II. Processo de revisão do Plano Diretor do Município de Altamira – PA, Dezembro, 2010.

ANA. **Mapa de áreas de afloramento dos Aquíferos do Brasil. Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos**, 2014. Disponível em: < https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/index.php/estantes/mapas/2845-mapa-de-areas-de-afloramento-dos-aquiferos-do-brasil> Acesso em: 06 de out. de 2023.

ALVES, D. N. B. **Remoção de ferro em água de irrigação através de filtragem em areia e zeólita**. LAVRAS: UFLA, 2008. 116p.

ALVES, Nailde Pinto; CASTRO, Jaelbe Lemos de; SOUSA, Mauro Alexandre Paula de. Controle e remoção de ferro e pH de água subterrânea por filtro confeccionado em escala domiciliar. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 285-300, 28 mar. 2021. Companhia Brasileira de Produção Cientifica. http://dx.doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2021.005.0025.

APHA (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). Washington DC: American Public Health Association.

ARAÚJO, D.L; ANDRADE, R.F. **Qualidade Físico-Química e Microbiológica da Água Utilizada em Bebedouros de Instituições de Ensino no Brasil: Revisão Sistemática da Literatura.** Braz. J. Hea. Rev., Curitiba, v. 3, n. 4, p. 7301-7324 jul./aug. 2020. ISSN 2595-6825.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. 1992.

BARCO, B. A. P. **Estudo da contaminação por ferro de águas subterrâneas provenientes da região noroeste do estado do Paraná.** Campo Mourão, 2017. Disponível em <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6146/1/contaminacaoferroaguassubterraneas.pdf> Acesso em: 07 de jun. 2023.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988.** Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acesso em: 15 de jun. de 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Fundação Nacional de Saúde**. Manual da solução alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa/ Superintendência Estadual do Pará. – Brasília: Funasa, 2017. 49 p.

BRASIL. **Programa Nacional de Saneamento Rural** / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 2019. 260 p.

BRASIL. Diário Oficial da União. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Publicado em: 07/05/2021 | Edição: 85 | Seção: 1 | Página: 127. Disponível em: < https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562> Acesso em: 29 de mar. de 2023.

BRASIL. **Programa Nacional de Saneamento Rural PNSR: aspectos conceituais da ruralidade no Brasil e interfaces com o saneamento básico** / Fundação Nacional de Saúde. – 1. ed. – Brasília: Funasa, 2021. 127 p.: il. – (Série Subsídios ao Programa Nacional de Saneamento Rural; v. 1).

CAMPOS, L. M. V.; THEBALDI, M. S.; SILVA, Y. F.; SILVA, M. L.; NOGUEIRA, V. H. B. Qualidade da água destinada ao consumo humano em Iguatama, MG, Brasil. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16 n.29; p. 2446 2019.

Castro-Jiménez, C.C., Grueso-Domínguez Correa-Ochoa, M.C. Dr., Saldarriaga-Molina, J.C., Garcia. E.F. Um processo de coagulação combinado com um sistema de filtragem de vários estágios para tratamento de água potável: uma alternativa para pequenas comunidades. **Água**, 14 (20) (2022), p. 3256.

CHAVES, S. C. S.; CARVALHO, V. S.; BARBOSA, I. M. B. R.; FERREIRA, A. A. Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife – PE. **Diversitas Journal.** Volume 7, Número 4 (out./dez. 2022) p. 2391 – 2398.

Chaysiri, R.; Chinviriyasit,W.; Louis, G. E. Optimal control strategies for water, sanitation, and hygiene in mitigating spread of waterborne diseases. **Journal of Process Control**, Volume 133, (2024) 103132.

CESÁRIO, J. M. S.; FLAUZINO, V. H. P.; MEJIA, J. V. C. Metodologia científica: Principais tipos de pesquisas e suas caraterísticas. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 05, Ed. 11, Vol. 05, pp. 23-33. Novembro de 2020.

Cescon, J.Q.; Jiang. Processo de filtração e material filtrante alternativo no tratamento de água. WC, 12 (12) (2020), p. 3377

CID-ESCOBAR, D.; FOLCH, A.; FERRER, N.; KATUVA, J.; SANCHEZ-VILA, X. An

assessment tool to improve rural groundwater access: Integrating hydrogeological modelling with socio-technical factors. **Science of the Total Environment** 912 (2024) 168864

CIOLETTI JÚNIOR, E.; CARMO, A. B.; LEITE, N. C.M. **Saneamento Básico Rural - Alternativas de tratamento de esgoto para o assentamento Dom Pedro Casaldáliga, Cajamar.** São Paulo, 2018. 144 p. Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Hidráulica e Ambiental.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J; FONTES, M. P. F. .; CURI, N. Seção II – Química e mineralogia do solo: Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e recôncavo baiano. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:1857-1872, 2008.

EVÊNCIO, K. M. M, *et al*. Dos Tipos de Conhecimento às Pesquisas Qualitativas em Educação; Id on Line **Rev. Mult. Psic**. V.13, N. 47, p. 440-452, outubro/2019.

FERNANDEZ, L. L.; FORNARI, L. H. T.; BARBOSA, M. V.; SCHRODER, N. Ferro e neurodegeneração. **Scientia Medica**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 218-224, out./dez. 2007.
IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/altamira.html. Acesso em 10 de jun. de 2023.

GARCÍA-AVILA, F.; AVILÉS-ANAZCO, A.; SANCHEZ-CORDERO, E.; VALDIVIEZO-GONZÁLES, L.; ORDONEZ, M. D. T. The challenge of improving the efficiency of drinking water treatment systems in rural areas facing changes in the raw water quality. **South African Journal of Chemical Engineering** 37 (2021) 141–149

García-Ávila, F.; Criollo-Illescas, F.; Zhindón-Arévalo, C.; García-Uzca, C.; Donoso-Moscoso, S.; Alfaro-Paredes, E. Integration of rapid filters for the provision of drinking water at rural home level. **Groundwater for Sustainable Development,** Volume 26, 2024.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa.** Coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GEORGIN, J.; LAZZARI, L.; Z CABRAL, J. C.; MARANGONI, L.D. Brasil: o acesso universal ao saneamento básico. **Revista Monografias Ambientais** - REMOA v.13, n.4, set-dez. 2014, p.3649-3654. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas** - UFSM, Santa Maria, e-ISSN 2236 1308. Disponível em: < https://periodicos.ufsm.br/remoa/article/view/14518/pdf> Acesso em: 26 de abr. 2024.

Gil, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GOUVEA, P. S. T. C.; FERREIRA, M. I. P. Avaliação da Eficiência das Unidades de

Tratamento Simplificado da Água na Região Serrana do Município de Macaé. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego. **Essentia editora Inffluminense**. Campos dos Goy tacazes/RJ, v.13 n.1, p. 43-67, jan./jun. 2019.

HOSSAIN, M. A.; HAQUE, M. I.; PARVIN, M. A.; ISLAM, M. N. Evaluation of iron contamination in groundwater with its associated health risk and potentially suitable depth analysis in Kushtia Sadar Upazila of Bangladesh. **Groundwater for Sustainable Development** 21 (2023) 100946

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados**. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/altamira.html. Acesso em 08 de jul. de 2024.

IPEA, INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 6. ODS 6. 2019. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html. Acesso em: 18 fev. 2023.

JANINI, T. C.; PENNA, M. C. V. M. Minorias ambientais circunstanciais e o direito fundamental de acesso ao saneamento básico. Revista Jurídica Cesumar - Mestrado, v. 21, n. 3, p. 645-656, setembro/dezembro 2021.

LIMA, R. F; GIRARD, L. Influência do leito de contato na eficiência de remoção de ferro de águas subterrâneas. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.6, n.1, p. 5 a 17, 2012.

LIMA, V. C.; LIMA, M. R.; MELO, V. F. **O solo no meio ambiente abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio.** Universidade Federal do Paraná. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Curitiba: Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2007 130p.: il. Disponível em: <http://www.gestaoescolar.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/solo_escola/solo_meio_ambiente.pdf> Acesso em: 22 e fevereiro 2024.

Maiyo JK, Dasika S, Jafvert CT. Filtros de areia lentos para o século 21: uma revisão. ***Revista Internacional de Pesquisa Ambiental e Saúde Pública***. 2023; 20(2):1019.

MAXIMILA, R. P. **Remoção de ferro e manganês por nanofiltração: comparativo dos custos de implantação com sistema convencional.** PORTO ALEGRE. UFRGS, 2016.

Medeiros, R.C., Fava, N. de M.N., Freitas, B.L.S., Sabogal-Paz, L.P., Oliveira, M.T., Oliveira, J., Fernández-Ibañez, P., Byrne. J.A. Tratamento de água potável por filtração em múltiplos estágios em escala domiciliar: eficiência e desafios. **Water Res**., 178 (2020).

MICHELAN, D. C. G. S.; SENS, M. L.; DALSASSO, R. L. Comparação da duração da carreira de filtração entre filtro lento com limpeza convencional e retrolavável. Scientia Plena 11, 113303, 2015.

MICHELAN, D. C. G. S.; BATISTA, I. F.; BATISTA, D. F.; SANTOS, D. G.;

MENDONÇA, L. C.; LIMA, D. M. F. Desempenho das etapas de tratamento de água da estação de tratamento de água Poxim. **SCIENTIA CUM INDUSTRIA**, V. 7, N. 3, PP. 7 - 14, 2019.

MONÇÃO, A. G.; VELOSO, R. B. A importância das águas subterrâneas para a gestão integrada dos recursos hídricos: captação, controle e monitoramento na bacia do rio Verde Grande. Águas Subterrâneas - Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas, 2021. Disponível em: < https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/30026/19427/111081> Acesso em: 29 de mar. de 2024.

Mubarak, M.F., Oliveira, A.M.G., Keshawy, M., Oliveira, T.A., Shehata. N. Adsorção de metais pesados e íons de dureza de águas subterrâneas em zeólita modificada: estudos em batelada e coluna. **Alex. Eng**. J., 61 (6) (2021)

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. **Revista de Engenharia e Tecnologia.** V. 4, N°. 1, Abr/2012.

OLIVEIRA, M.F. Metodologia científica: um manual para a realização de pesquisas em administração. (pós-graduação) – Universidade Federal de Goiás, Catalão: UFG, 2011. 72 p.: il.

OLIVEIRA, R. R.; ARAÚJO, A. L. C.; DUARTE, M. A. C. Estudo do potencial de formação de trihalometanos na lagoa de Extremoz (RN). **Eng Sanit Ambient** | v.25 n.2 | mar/abr 2020 | 315-322.

PAZ, E. C. **Análise da eficiência de remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento por filtração adsortiva.** PONTA GROSSA, 2016.

PEREIRA, T. T. C.; OLIVEIRA, F. S.; FREITAS, D. F.; DAMASCENO, B. D.; DIAS, A. C. A mineralogia dos solos tropicais: Estado da arte e relação com o uso e manejo. **Geonomos**, 28(1), 1-14, 2020.

POLIAKOV, V. L.; MARTYNOV, S.Y. Technological modeling of physicochemical removal of iron from deep groundwater. **Heliyon** 9 (2023) e20202

QUANSAH, J.O.; OBIRI-NYARKO, F.; KARIKARI.A.Y. Adsorptive removal of dissolved Iron from groundwater by brown coal – A low-cost adsorbent. **Journal of Contaminant Hydrology** 260 (2024) 104283

RODRIGUES, S. R.; SANTOS, D. R. S.; SILVA, M. M.; ARAUJO, A.; ROCHA, C. G. S. Composição florística de fragmento de floresta secundária em áreas de proteção permanente do Igarapé Dispensa, no Projeto de Assentamento Assurini em Altamira – Pará. **Revista Biotemas,** 33 (1), março de 2020.

Sabogal-Paz, L. P., Campos, L. C., Bogush, A., Canales. M. Filtros de areia lentos domiciliares em fluxos intermitentes e contínuos para tratar água contendo baixas concentrações de íons minerais e Bisfenol A. ***Sci. Environ***. 2020, *702*, 135078

SIAGAS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas.** Ficha Técnica Completa de Poço. CPRM. Serviço Geológico do Brasil, 2003. Disponível em: < http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/exportar_pdf.php?ponto=1500003355> Acesso em: 22 de set. 2023.

Silva, F. C., Moraes, V. M.C, Coutinho, E., C., Ribeiro, H. M. C., Fagundes Ferreira Chaves, A., Barbosa, A. J. S. S. Gutierrez, L. A. C. L. (2023). Tecnologias de remoção de ferro em águas subterrâneas: uma revisão sistemática. ***Peer Review***, *5*(26), 104–118.

SILVA, R. O.; SILVA, A. B. Diagnóstico do Sistema de Abastecimento de Água em Zona Urbana Sob a Percepção do Usuário no Município de Tucuruí-PA. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**. V.7, 2021.

SOARES, I. S.; COSTA, M. S. B.; GOMES, M. A.; FREITAS, A. A.; BARROS, A. J. Estudo da remoção e controle de ferro nas águas da nascente Serra do Andrade-MG. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, e59910615980, 2021.

TAVARES, S. R. L. **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. - Dados eletrônicos.- Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 228 p.: il. Disponível em: < https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/340067/curso-de-recuperacao-de-areas-degradadas-a-visao-da-ciencia-do-solo-no-contexto-do-diagnostico-manejo-indicadores-de-monitoramento-e-estrategias-de-recuperacao> Acesso: 20 de dez. 2023.

THOMAZ, K. T. C.; QUEIROZ, L. S.; FAIAL, K. C. F.; ZAMIAN, J. R.; NASCIMENTO, L. A. S.; ROCHA FILHO, G. N.; SOUZA, L. K. C.; COSTA, C. E. F. Removal of Fe and Mn ions from groundwater using activated carbon obtained from waste products of Brazil nut and andiroba cultivation in the Amazon region. **Sustainable Materials and Technologies** 38 (2023).

VASQUEZ, M.L.; SOUSA, C.S.; CARVALHO, J.M.A. (Orgs.). 2008. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará**, escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. CPRM-Serviço Geológico do Brasil, Superintendência Regional de Belém. Disponível em: < http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/para.pdf> Acesso em: 6 de nov. de 2023.

Viegas,C. J.T.; Araújo, E. P.; Sousa, T. S.; Cunha, H. F. A.; Cunha, A. C. Variação geoespacial de indicadores de saneamento básico e de saúde dos ex-territórios federais na Amazônia. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.17, n.2 (2024) 1038-1059.

VISTUBA, Jacqueline Pereira. **Remoção de ferro e manganês de água de abastecimento por meio de filtração adsortiva.** 2010. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VITOR, G. A.; LANDO, G. A.; DUARTE, C. A. L.; MARQUES, D. A. V.; D'ANGELO, I. B. M. Saúde e saneamento no Brasil: uma revisão narrativa sobre a associação das condições de saneamento básico com as doenças de veiculação hídrica. Research, Society and Development, v. 10, n. 15, e521101522913, 2021.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais. 2005.

Waangsir, F.W.F., Arnawa, G.P., Sadukh, J.J.P., Suluh. D.G. Uso de vários meios de filtração na redução do nível de dureza da água. **Penelitian Pendidikan IPA**, 9 (3) (2023)

WICHTMANN, T.; TRIANTAFYLLIDIS, T.; SPÄTH, L. On the influence of grain shape on 149 the cumulative deformations in sand under drained high-cyclic loading. **Soils and Foundations**. v. 59, n. 1, p. 9, 2019.

WINCK, N. B. **Avaliação Hidrogeológica, Hidroquímica e da Ocorrência de Ferro e Manganês nas Águas Subterrâneas do Distrito de Ipiranga, Região Noroeste do Município de Gravataí**. 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

WU. Q.;CHEN CHEN, C.; ZHANG, Y.; TANG, P.; REN, X.; SHU, J.; LIU, X.; XIN CHENG, X.; TIRAFERRI, A.; LIU, B. Safe purification of rural drinking water by biological aerated filter coupled with ultrafiltration. **Science of the Total Environment** 868 (2023) 161632

YAN, C.; WAN, W.; WANG, R.; LAI, T.; ALI, W.; HE, S.; LIU, S.; LI, X.; NASIR, Z. A.; COULON, F. Quantitative health risk assessment of microbial hazards from water sources for community and self-supply drinking water systems. **Journal of Hazardous Materials** 465 (2024) 133324

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de pesquisa**. - 2. ed. reimp. – Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/ UFSC, 2013.

## APÊNDICE - ARTIGO SUBMETIDO

(Revista de Gestão Ambiental e Social - ISSN: 1981-982X)

Avaliação e Comparação da Eficiência de Diferentes Meios Filtrantes na Remoção de Ferro em Águas Subterrâneas no Município de Altamira-PA

RGSA
REVISTA DE GESTÃO SOCIAL E AMBIENTAL

**RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental**
**ISSN:** 1981-982X
**Submission date:** xx/xx/xxxx
**Acceptance date:** xx/xx/xxxx
**DOI:** https://doi.org/10.24857/rgsa.v00n0-
**Organization:** Interinstitutional Scientific Committee
**Chief Editor:** Ana Carolina Messias de Souza Ferreira da Costa
**Assessment:** Double Blind Review by SEER/OJS

# AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE DIFERENTES MEIOS FILTRANTES NA REMOÇÃO DE FERRO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ALTAMIRA-PA

## RESUMO

**Objetivo:** O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência de diferentes meios filtrantes areia, antracito e zeólita, na remoção de cor, turbidez e ferro de águas subterrâneas, visando contribuir para o aprimoramento do tratamento de água potável.

**Referencial Teórico:** A pesquisa fundamenta-se na relevância do fornecimento de água tratada para a saúde pública e o desenvolvimento urbano, em consonância com a Portaria nº 888/2021, que estabelece os padrões de potabilidade no Brasil.

**Método:** Foram conduzidas carreiras de filtração com duração entre 6 a 10 horas para os três meios filtrantes, com coleta de amostras após 30 minutos do início e a cada 2 horas. Os testes envolveram a filtração simples.

**Resultados e Discussão:** Na filtração simples com areia, as eficiências de remoção variaram de 82,41% a 85,96% para turbidez, de 20,23% a 56,56% para cor e de 0% a 92,2% para ferro. O meio filtrante de antracito apresentou desempenho superior à areia, com eficiências de 89,46% a 95,58% para turbidez, 66,87% a 78,89% para cor e 100% para ferro. A zeólita obteve os melhores resultados entre os materiais avaliados, com remoções de 99,53% a 100% para turbidez, 92,65% a 96,56% para cor e 100% para ferro, superando os demais meios filtrantes e atendendo plenamente aos limites estabelecidos pela legislação vigente.

**Implicações da Pesquisa:** Os resultados evidenciam o potencial da zeólita como meio filtrante de alta eficiência, podendo subsidiar melhorias em sistemas de abastecimento de água e apoiar a formulação de políticas públicas que assegurem o acesso universal à água potável de qualidade.

**Originalidade/Valor:** Este estudo agrega valor à literatura ao comparar de forma sistemática diferentes meios filtrantes no tratamento de águas subterrâneas, destacando a zeólita como alternativa promissora. A originalidade reside na análise comparativa detalhada, que contribui para a otimização de processos de tratamento e para a promoção da saúde pública.

**Palavras-chave:** Filtração Simples, Tratamento de Água, Remoção de Ferro.

# EVALUATION AND COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF DIFFERENT FILTER MEDIA IN REMOVING IRON FROM GROUNDWATER IN THE MUNICIPALITY OF ALTAMIRA, PARÁ

## ABSTRACT

Objective: The objective of this study was to evaluate the efficiency of different filter media - sand, anthracite, and zeolite - in removing color, turbidity, and iron from groundwater, with a view to contributing to the improvement of drinking water treatment.

Theoretical Framework: The research is based on the importance of treated water supply for public health and urban development, in line with Ordinance No. 888/2021, which establishes potability standards in Brazil.

Method: Filtration runs lasting between 6 and 10 hours were conducted for the three filter media, with samples collected 30 minutes after the start and every 2 hours thereafter. The tests involved simple filtration.

Results and Discussion: In simple sand filtration, removal efficiencies ranged from 82.41% to 85.96% for turbidity, from 20.23% to 56.56% for color, and from 0% to 92.2% for iron. The anthracite filter medium performed better than sand, with efficiencies ranging from 89.46% to 95.58% for turbidity, 66.87% to 78.89% for color, and 100% for iron. Zeolite obtained the best results among the materials evaluated, with removals of 99.53% to 100% for

turbidity, 92.65% to 96.56% for color, and 100% for iron, surpassing the other filter media and fully meeting the limits established by current legislation.

Research Implications: The results highlight the potential of zeolite as a highly efficient filter medium, which could contribute to improvements in water supply systems and support the formulation of public policies that ensure universal access to safe drinking water.

Originality/Value: This study adds value to the literature by systematically comparing different filter media in groundwater treatment, highlighting zeolite as a promising alternative. Its originality lies in the detailed comparative analysis, which contributes to the optimization of treatment processes and the promotion of public health.

Keywords: Simple Filtration, Water Treatment, Iron Removal.

RGSA adota a Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento e distribuição de água destinada para o consumo humano estão continuadamente associados com a saúde pública e ao desenvolvimento das cidades, além de constituírem requisitos fundamentais do saneamento básico, dada a sua essencialidade nas atividades humanas (Von Sperling, 2011; Chaysiri; Chinviriyasit; Louis 2024; Viegas *et al*., 2024; Yan *et al*. 2024).

Entretanto, o uso inadequado e inconsciente da água representa uma ameaça à sua qualidade e quantidade, principalmente por ser considerada um solvente universal, com isso, cada vez mais, esse recurso está sujeito à poluição e contaminação, seja por atividades antrópicas ou por fatores naturais de origem geoquímica (Soares *et al*., 2021; Chaves *et al*., 2022).

Nessa perspectiva, as formações geológicas e as características dos solos e das rochas, podem alterar significativamente a qualidade das águas subterrâneas, especialmente pela presença elevada de ferro dissolvido, a qual está frequentemente associada ao manganês (Almeida *et a*l., 2020; Hossain *et al*, 2023).

Nesse sentido, no Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde nº 888 de 4 de maio de 2021 regulamenta os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. De acordo com a referida portaria, o valor máximo permitido para o parâmetro ferro é de 0,3 mg/L, uma vez que níveis superiores ao permitido comprometem as características organolépticas da água e geram insegurança quanto ao seu uso (Brasil, 2021; Silva *et al*., 2023; Quansah; Obiri-Nyarko; Karikari, 2024).

Logo, a presença de ferro na água em concentrações superiores a 0,3 mg/L, traz diversos

inconvenientes e insegurança para seus usuários, principalmente, no que se refere a alteração da cor, gosto e odor da água, além de causar corrosão, incrustações e obstruções nas redes de distribuição, bem como favorecer o crescimento de bactérias ferruginosas. Além disso, podem danificar roupas e utensílios domésticos e prejudicar os processos industriais (Almeida *et al*., 2017; Barco, 2017; Mubarak *et al*., 2021; Silva e Silva, 2021; Poliakov e Martynov, 2023; Thomaz *et al*., 2023; Quansah; Obiri-Nyarko; Karikari, 2024).

Ademais, embora o ferro seja um elemento essencial para a saúde humana, seu consumo em excesso pode levar à bioacumulação nos tecidos do organismo, estando associado ao desenvolvimento de distúrbios neurológicos, como Alzheimer e Parkinson (Fernandez *et al*., 2007; Paz, 2016; Barco, 2017).

Nesse sentido, a presença de ferro na água representa uma problemática que precisa ser enfrentada, especialmente em mananciais subterrâneos localizados em zonas rurais da Amazônia. De acordo com Silva *et al*. (2023), as águas dessa região são frequentemente alteradas devido à dissolução de ferro e manganês provenientes das rochas e minerais presentes no subsolo.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo avaliar e comparar a eficiência de diferentes meios filtrantes - especificamente areia, antracito e zeólita - na remoção de ferro, cor e turbidez presente em águas subterrâneas, considerando a eficácia da filtração simples.

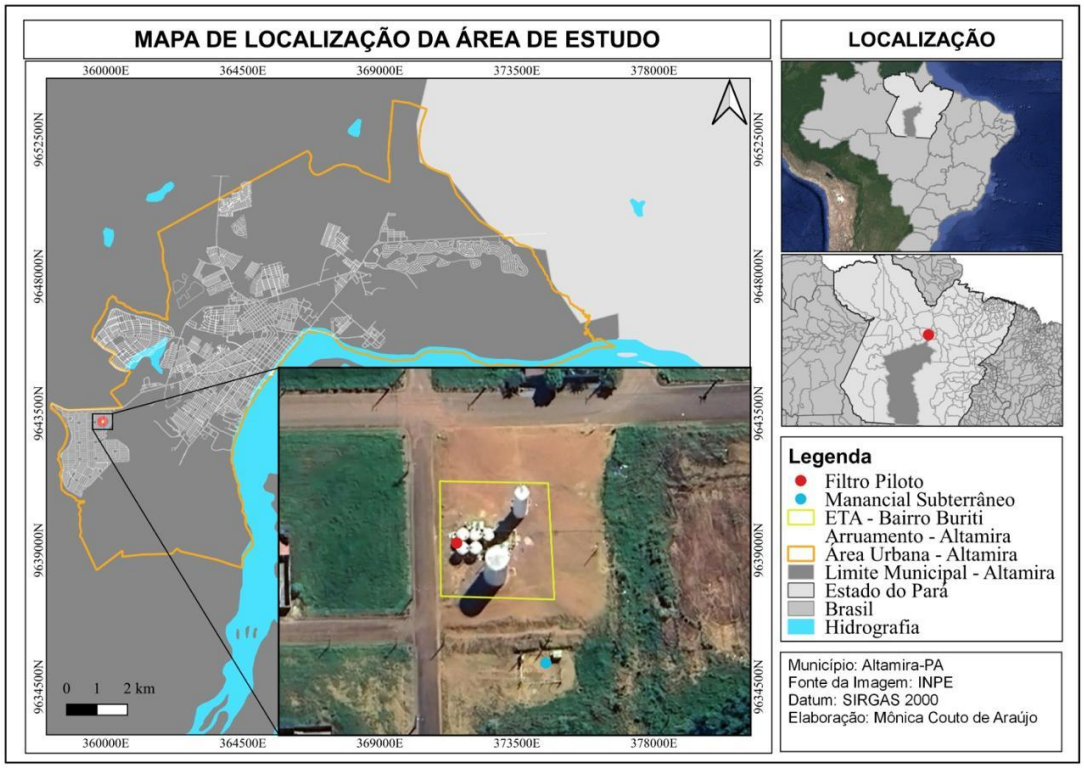
Portanto, a pesquisa busca contribuir para a redução das desigualdades no acesso à água potável, atendendo tanto aos padrões de potabilidade estabelecidos pela portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021 quanto ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, que visa garantir acesso universal à água potável até 2030 (IPEA, 2019; Cid-Escobar *et al*., 2024; García-Ávila *et al*., 2024).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de tratamento de água avaliado foi implantado logo após a saída de água bruta de um dos poços que abastecem uma Estação de Tratamento de Água (ETA) localizada na zona urbana do município de Altamira-PA, região Norte do Brasil. A instalação ocorreu no bairro Buriti, sob as coordenadas geográficas 3°16’8,28” S e 52°23’24,62” W, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1**

*Mapa de localização da área de Estudo.*




Fonte: Autoria (2025).

O poço em estudo faz a captação de água no aquífero fraturado norte (ANA, 2014). Sendo o Aquífero fissural livre (SIAGAS, 2014). Este aquífero pertencente a Bacia do Amazonas na forma de diques e soleiras de Diabásio, rochas estas denominadas de Diabásio Penatecaua, a qual apresenta a presença de ferro na água, com formação curuá e ererê (Vasquez; Sousa; Carvalho, 2008).

O solo que caracteriza o local de estudo de acordo com a Ficha Técnica do Poço disponível no SIAGAS (2014) é o solo argiloso arenoso de cor amarelo avermelhado. O que pode explicar a presença de ferro na água, visto que de acordo com Silva *et al*, (2023), o ferro é característico nesses tipos de solos, pois são ricos de materiais inorgânicos.

## 2.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

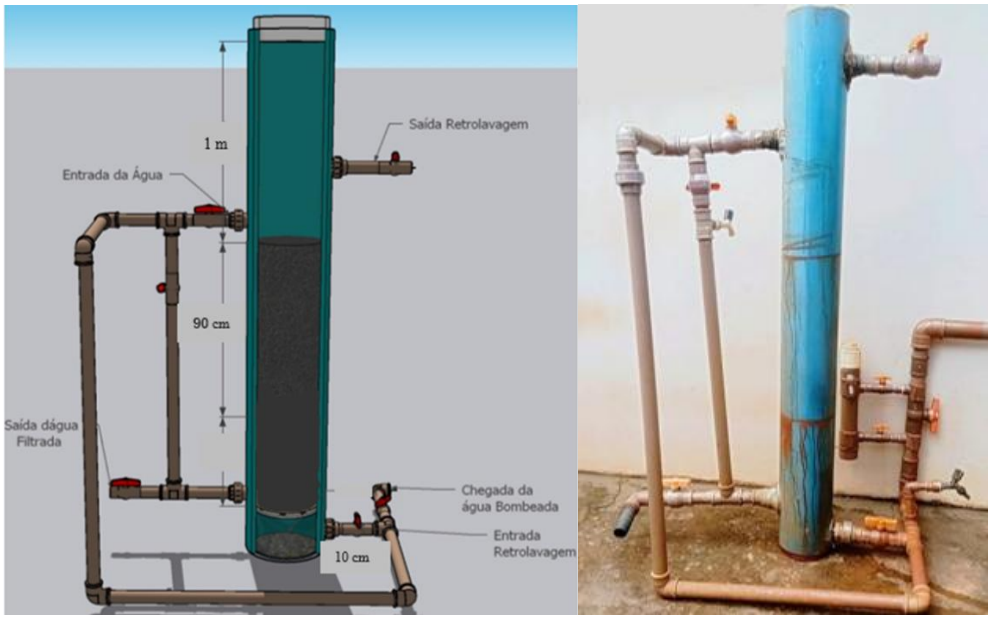
O filtro piloto foi construído utilizando tubo de PVC com diâmetro de 150 mm e altura de 2,0 metros, equipado com conexões em PVC de 40 mm. Na Figura 2 são apresentados o desenho esquemático do sistema piloto e o filtro completo.

O leito filtrante com altura de 90 cm foi preenchido sequencialmente com três meios filtrantes distintos: areia, antracito e zeólita. Acima do leito filtrante, foi mantido um espaço livre de 1 metro, destinado à avaliação da perda de carga e da carreira de filtração do sistema. Todos os meios filtrantes foram previamente lavados para remoção de impurezas.

A instalação do filtro ocorreu por meio de um by-pass no sistema de abastecimento existente, possibilitando adequar a taxa de filtração à capacidade do sistema piloto, conforme a NBR 12.216/92.

**Figura 2**

*Desenho esquemático do filtro piloto e sistema piloto completo.*




Fonte: Autoria (2025).

## 2.2 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

Na fase de pré-operação do filtro, foram definidos os seguintes parâmetros operacionais: a taxa de filtração, perda de carga, carreira de filtração dos meios filtrantes e tempo de retrolavagem.

A taxa de filtração adotada neste estudo refere-se a projetos de filtros rápidos, de camada simples e fluxo descendente, sendo calculada conforme a norma NBR 12216/1992, que estabelece diretrizes para projetos de estação de tratamento de água para abastecimento público (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992).

No dimensionamento da vazão do sistema piloto, foram considerados dois parâmetros iniciais: o diâmetro do filtro e a taxa de filtração. A taxa de filtração adotada foi de 180 $m^3/m^2$/dia. Para esse cálculo, utilizou-se a Equação 1. Onde: q – Taxa de filtração (m3.m2/dia); A – Área do filtro (m2); e Q – Vazão nominal (L/s).

$$Q = \frac{q}{A} \qquad (1)$$

A perda de carga corresponde à altura da lâmina d'água acima do meio filtrante ao longo da carreira de filtração. Essa medida é fundamental para definir o tempo da carreira de filtração, uma vez que o aumento da perda de carga pode comprometer a eficiência do filtro.

A perda de carga também pode ser observada quando ocorre o fenômeno chamado transpasse, que acontece quando a capacidade do meio filtrante de reter impurezas é superada. O transpasse ocorre devido à sobrecarga do sistema de filtração, geralmente após um determinado período de operação do leito filtrante, o que torna eminente sua limpeza (Brasil, 2017).

A retrolavagem do filtro deve ser realizada quando a perda de carga atinge sua altura máxima, o que ocorre, geralmente, ao se atingir cerca de 1,0 metro de lâmina d'água sobre o leito filtrante durante a carreira de filtração, ou ainda quando há transpasse excessivo de impurezas, conforme indicado por Michelan, Sens e Dalsasso (2015).

Logo, o processo de retrolavagem do sistema acontece por contrafluxo, ou seja, de forma ascendente, uma vez que o filtro funciona em fluxo descendente. Esse procedimento é necessário para que ocorra a expansão do meio filtrante e, por conseguinte, carregue as impurezas depositadas no material filtrante.

## 2.3 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS E AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA

Para avaliar a eficiência do sistema foram testados diferentes meios filtrantes: areia, antracito e zeólita, sendo realizadas três carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas para cada meio filtrante. Os ensaios foram realizados no período de setembro de 2024 a janeiro de 2025.

Os parâmetros analisados para testar a eficiência dos meios filtrantes foram o pH, temperatura, cor, turbidez, ferro.

Para a avaliação da eficiência do sistema, em cada um dos ensaios, foi realizada a coleta tanto de água bruta como da água tratada 30 minutos após a operação do sistema e posteriormente a cada intervalo de 2 horas, considerando o início de cada carreira de filtração. A única exceção foi a determinação do ferro na água bruta, neste caso foram realizadas três coletas em dias alternados, uma vez que essa análise foi necessária apenas para confirmar o teor de ferro presente na água.

Os parâmetros foram avaliados em função dos valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância. Além disso, o cálculo da eficiência da remoção de turbidez, cor e ferro foi

aplicada a Equação 2, em relação a média dos resultados. Onde: E = Eficiência de remoção; Cb = Concentração na água bruta; e Ct = Concentração na água tratada.

$$E=\frac{Cb-Ct}{Cb} * 100 \qquad (2)$$

Adicionalmente, os resultados obtidos para cada parâmetro foram comparados aos limites estabelecidos pela Portaria nº 888/2021. Também foi avaliada a eficiência de cada meio filtrante utilizado, a fim de identificar aquele que apresentou o melhor desempenho.

As amostras foram coletadas em frascos de polietileno devidamente esterilizados e armazenadas em isopor com gelo, e levadas para laboratório para análises, com exceção do pH e temperatura que foram medidos *in loco*, imediatamente após a coleta, sendo utilizada a metodologia *Standard Methods for the Examination of water and wastewater*.

A periodicidade das coletas de amostras foi definida com base nas condições operacionais da Estação de Tratamento de Água. Os intervalos de coleta foram estabelecidos em conjunto com a equipe gestora da ETA, de modo a não comprometer o abastecimento da população nem interferir no funcionamento da unidade. Apesar do sistema operar em regime contínuo, 24 horas por dia, há a presença de uma bóia automática que interrompe periodicamente o bombeamento dos poços. Dessa forma, para assegurar a continuidade do fluxo durante o estudo, foi necessário ajustar os tempos de operação do sistema piloto.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 REALIZAÇÃO DE ENSAIOS E AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA

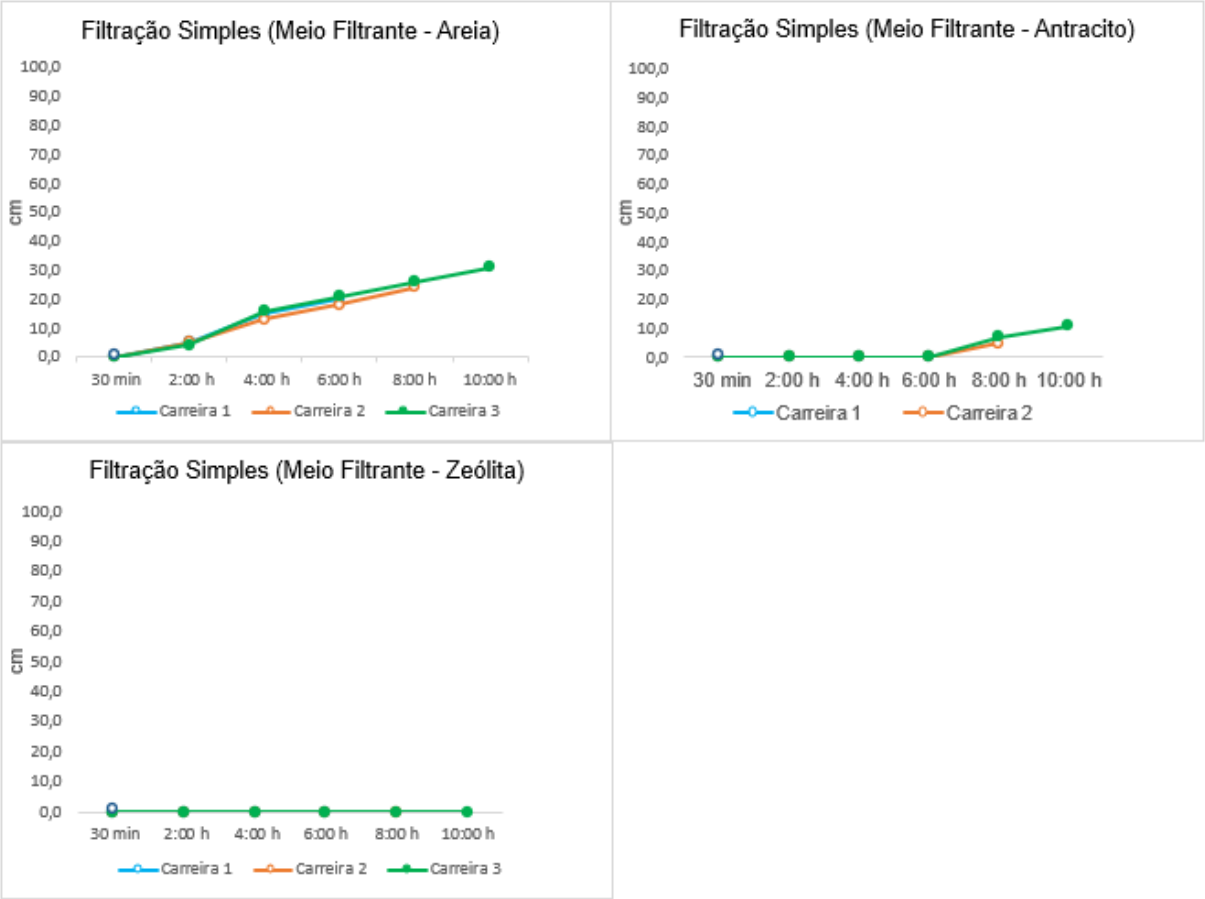
O filtro foi operado com uma vazão de entrada de 0,037 L/s, equivalente a 2,2 L/min, para ambos os materiais filtrantes conforme o dimensionamento e as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 12.216/1992, que prevê uma taxa de filtração de até 180 $m^3/m^2/dia$.

### 3.2 PERDA DE CARGA E CARREIRA DE FILTRAÇÃO

O monitoramento da perda de carga, em ambos os meios filtrantes, foi analisado a cada 2 horas ao longo do funcionamento do filtro. Na Figura 3, são apresentados os comportamentos das carreiras de filtração dos ensaios dos diferentes meios filtrantes, com os correspondentes progresso da perda de carga.

**Figura 3**

*Carreiras de Filtração dos Meios Filtrantes: Areia, Antracito e Zeólita.*




Fonte: Autoria (2025).

Pode ser observado que, a maior perda de carga registrada no processo de filtração simples com areia, foi de 31 cm na carreira 3, após 10 horas do funcionamento do filtro. Já no processo de filtração simples com o antracito, a maior perda de carga registradas foi de 11 cm na carreira 3, após 10 horas de funcionamento. Por fim, no processo de filtração simples utilizando zeólita como meio filtrante, não foi registrada perda de carga ao longo das carreiras de filtração.

Os resultados indicam que a zeólita foi o meio filtrante mais eficiente em termos de perda de carga, o que sugere seu potencial para filtrações mais longas. Em contraste, o processo de filtração com areia apresentou as maiores perdas de carga entre as carreiras avaliadas.

Ademais, verificou-se que nenhuma das carreiras de filtração, para ambos os materiais, atingiu a perda de carga necessária que justificaria a interrupção da operação dos filtros, condição que seria alcançada quando a lâmina d'água atingisse 1,0 metro de altura acima do leito filtrante.

A perda de carga representa a resistência imposta pelo leito filtrante ao longo do tempo, impactando diretamente a eficiência do processo de filtração e a necessidade de intervenções operacionais, como a retrolavagem. Segundo Vistuba (2010), a duração recomendada para carreiras de filtração em filtros rápidos deve ser superior a 12 horas, sendo considerada eficiente quando ultrapassa 24 horas.

## 3.3 RETROLAVAGEM

O procedimento de retrolavagem foi realizado no início e ao final de cada carreira de filtração, com o objetivo de remover as impurezas acumuladas no meio filtrante e evitar interferências no desempenho da carreira subsequente. A retrolavagem teve duração de 10 a 15 minutos após o encerramento de cada ciclo de filtração, e de 5 minutos antes do início do próximo, tempo considerado suficiente para a completa limpeza do leito filtrante. Na Figura 4 é mostrado o processo de retrolavagem, evidenciando a necessidade deste procedimento para garantir a eficiência do sistema.

**Figura 4**

*Retrolavagem no final das carreiras (a) retrolavagem no início das carreiras (b).*

Fonte: Autoria (2025).

## 3.4 ANÁLISE DE FERRO NA ÁGUA BRUTA

Para verificação do teor de ferro na água bruta, foram coletadas três amostras em dias alternados. As análises laboratoriais indicaram a presença de ferro na ordem de 5 mg/L. Esses resultados foram consistentes com os dados de monitoramento da ETA, conforme apresentado no Tabela 1.

**Tabela 1**

*Valores de ferro encontrados em amostras de água bruta*

| Parâmetro | Amostra 1 (30/09/2024) | Amostra 2 (09/10/2024) | Amostra 3 (14/12/2024) | VMP* |
|---|---|---|---|---|
| **Ferro (Mg/L)** | 5 | 5 | 5 | 0,3 |

* Valor Máximo Permitido pela Portaria n° 888/2021

Os resultados das análises da água bruta indicam que a concentração de ferro excede o limite máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela Portaria 888/2021.

A presença de ferro na água pode ser justificada por meio das características dos solos e rochas onde o poço foi perfurado, uma vez que os latossolos avermelhados ou amarelos surgem devido a presença de ferro, a qual possuem predominância dos minerais argilosos, tendo na composição mineralógica a caulinita e óxidos de ferro e alumínio.

Essas características dos solos são devido a formação de compostos (óxidos), justamente pelo elemento químico ferro, advindo das alterações e intemperismos das rochas que consequentemente a rocha se torna mais porosa o que passa a reter água e compostos químicos (Lima; Lima; Melo, 2007; Corrêa *et al*., 2008; Tavares, 2008).

## 3.5 EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO SIMPLES COM AREIA

Para a avaliação da eficiência da areia como meio filtrante, foi utilizada areia com granulometria correspondente a 0,45 a 0,55 mm, sendo realizadas 3 carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta os resultados das análises das amostras de água realizadas após cada coleta, contemplando os parâmetros de turbidez, cor, ferro, pH e temperatura, avaliados tanto na água bruta quanto na água tratada.

**Tabela 2**

*Resultados da filtração simples com areia.*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| **Água Bruta** | **Turbidez (UT)** | 14,9 | 14,1 | 15,6 | 15,9 | 15,8 | 15,5 | 16,2 | 16,7 | 16,4 | 15,6 | 14,8 | 15,3 | 16,1 | 16,3 | 15,9 |
| | **Cor (UC)** | 27,9 | 23,6 | 23,9 | 26,3 | 18,1 | 19,2 | 18,8 | 20 | 19,7 | 15,4 | 17,8 | 16,6 | 17,3 | 19,3 | 29,7 |
| | **Ferro (mg/L)** | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | **pH** | 7,16 | 7,2 | 7,18 | 7,16 | 7,13 | 7,19 | 7,17 | 7,2 | 7,25 | 7,16 | 7,15 | 7,16 | 7,16 | 7,15 | 7,11 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Temp. (°C)** | 29,1 | 30,4 | 31,3 | 31,8 | 30,3 | 30,7 | 31,3 | 31,7 | 30,4 | 29,7 | 30,3 | 31,1 | 31,3 | 31,7 | 31,7 |
| | **Duração (h)** | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| **Água Tratada** | **Parâmetro** | **Carreira 1** | | | | **Carreira 2** | | | | | **Carreira 3** | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| | **Turbidez (UT)** | 2,45 | 2,48 | 2,69 | 2,72 | 2,34 | 2,4 | 2,38 | 2,49 | 2,61 | 2,19 | 2,26 | 2,27 | 2,34 | 2,38 | 2,29 |
| | **Cor (UC)** | 16,9 | 18,8 | 16,4 | 18,6 | 10,3 | 10,1 | 11,2 | 11,6 | 11,8 | 10,6 | 10,1 | 11,6 | 13,8 | 10,8 | 12,9 |
| | **Ferro (mg/L)** | 0,96 | 1,9 | 1,47 | 1,5 | 0,65 | 1,27 | 1,12 | 0,81 | 3,87 | 0,8 | 0,8 | 0,53 | 0,39 | 4,33 | 5 |
| | **pH** | 7,16 | 7,15 | 7,15 | 7,16 | 7,1 | 7,17 | 7,14 | 7,12 | 7,25 | 7,15 | 7,14 | 7,14 | 7,17 | 7,15 | 7,12 |
| | **Temp. (°C)** | 29,7 | 30,6 | 31,5 | 32 | 30,5 | 31 | 31,8 | 32,3 | 31 | 29,9 | 30,4 | 31,2 | 31,7 | 32,2 | 32,2 |
| | **Duração (h)** | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 3, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância dos parâmetros turbidez, cor, ferro, pH e temperatura, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

Em relação aos parâmetros de pH e temperatura, não foram verificadas variações significativas entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,11 a 7,25 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,10 e 7,25. Já a temperatura variou de 29,1°C a 31,8°C na água bruta e de 29,7°C a 32,3°C na água tratada.

Em termos de turbidez, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece, para águas subterrâneas, pós-filtração rápida, o limite de 0,5 uT em 95% das amostras coletadas a cada 2 horas, sendo permitido atingir até 1,0 uT nos 5% das amostras mensais coletadas. E para o processo de pós-desinfecção, o limite estabelecido é de 1,0 uT em 95% das amostras coletadas semanalmente e 5,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.

Os resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram valor mínimo de 14,1 uT e máximo de 16,7 uT, observados após 2 horas do início da operação da carreira de filtração 1 e 6 horas após a carreira de filtração 2, respectivamente, indicando, portanto, a necessidade de tratamento voltado para a redução da turbidez, em razão dos valores observados na água bruta serem superiores aos definidos na Portaria nº 888. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 2,19 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 3, enquanto o maior valor foi de 2,61 verificado na carreira de filtração 2, após 6 horas de operação.

**Tabela 3**

*Eficiência da filtração simples com areia.*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 14,1 | 15,9 | 15,13 | 0,8 | 0,64 | 15,5 | 16,7 | 16,12 | 0,48 | 0,23 | 14,8 | 16,3 | 15,67 | 0,55 | 0,31 |
| | Cor (UC) | 23,6 | 27,9 | 25,43 | 2,05 | 4,18 | 18,1 | 20 | 19,16 | 0,75 | 0,56 | 15,4 | 29,7 | 19,35 | 5,23 | 27,38 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | pH | 7,16 | 7,2 | 7,18 | 0,02 | 0 | 7,13 | 7,25 | 7,19 | 0,04 | 0 | 7,11 | 7,16 | 7,15 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 29,1 | 31,8 | 30,65 | 1,18 | 1,4 | 30,3 | 31,7 | 30,88 | 0,6 | 0,36 | 29,7 | 31,7 | 30,97 | 0,81 | 0,65 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 2,45 | 2,72 | 2,59 | 0,14 | 0,02 | 2,34 | 2,61 | 2,44 | 0,11 | 0,01 | 2,19 | 2,38 | 2,29 | 0,07 | 0 |
| | Cor (UC) | 16,4 | 18,8 | 17,68 | 1,2 | 1,45 | 10,1 | 11,8 | 11 | 0,76 | 0,59 | 10,1 | 13,8 | 11,63 | 1,44 | 2,08 |
| | Ferro (mg/L) | 0,96 | 1,9 | 1,46 | 0,39 | 0,15 | 0,65 | 3,87 | 1,54 | 1,32 | 1,75 | 0,39 | 5 | 1,98 | 2,1 | 4,41 |
| | pH | 7,15 | 7,16 | 7,16 | 0,01 | 0 | 7,1 | 7,25 | 7,16 | 0,06 | 0 | 7,12 | 7,17 | 7,15 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 29,7 | 32 | 30,95 | 1,01 | 1,03 | 30,5 | 32,3 | 31,32 | 0,72 | 0,52 | 29,9 | 32,2 | 31,27 | 0,95 | 0,91 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |

Fonte: Autoria (2025).

Desse modo, embora a água tratada tenha apresentado uma redução nos níveis de turbidez os valores registrados ainda ultrapassaram os padrões de potabilidade exigidos para pós-filtração rápida. Nesse contexto, reforça-se a importância dos processos de tratamento e do monitoramento contínuo, uma vez que o cumprimento desses parâmetros é essencial para assegurar a potabilidade da água, minimizar riscos à saúde pública e garantir um abastecimento seguro e de qualidade.

Ademais, a cor da água em sistemas públicos de abastecimento é um fator visualmente indesejável. Dessa forma, a avaliação desse parâmetro é crucial, pois uma coloração elevada pode comprometer a qualidade estética da água e levar os consumidores a buscarem fontes alternativas de abastecimento, que podem ser inadequadas e representar riscos à saúde (Araújo; Andrade, 2020). As análises realizadas para o parâmetro cor identificaram valores superiores ao limite de potabilidade de 15 uH, estabelecido pela portaria vigente.

Nessa perspetiva, o menor valor registrado na água bruta foi de 15,4 uH, observado após 30 minutos do início da operação da carreira de filtração 3, enquanto o maior valor, de 29,7 uH identificado após 10 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 10,1 uH, observado após 2 horas de funcionamento nas carreiras de filtração 2 e 3. Já o maior valor foi de 18,8 uH verificado na

carreira de filtração 1, após 2 horas de operação. Portanto, embora o processo de filtração simples com areia tenha atendido ao padrão de potabilidade para o parâmetro cor nas carreiras de filtração 2 e 3, ele não se mostrou eficaz na remoção da cor na carreira de filtração 1.

Com relação ao parâmetro ferro, este apresentou uma redução significativa após a passagem pelo sistema de filtração nas primeiras 6 horas de funcionamento de ambas as carreiras de filtração. No entanto, essa redução não foi suficiente para atender ao limite máximo de 0,3 mg/L estabelecido pela Portaria 888. Sendo que, o menor valor registrado foi de 0,39 mg/L, observado após 6 horas de funcionamento na carreira 3 e o maior valor foi de 5 mg/L, verificado na mesma carreira após 10 horas de operação.

Percebe-se que a utilização de areia como leito filtrante na filtração simples, embora inicialmente remova o ferro da água, não se mostra eficiente ao longo do tempo, haja vista que com o passar das horas, não apenas ocorre a passagem do ferro da água bruta, mas também o desprendimento do ferro acumulado que havia sido retido. Assim, embora a areia tenha alcançado significativa eficiência na remoção de ferro até 6 horas de funcionamento do filtro, seu uso isolado não foi suficiente para atender ao padrão de potabilidade. Diante dos resultados, fica evidente a necessidade do processo de oxidação do ferro, seguido pela filtração do precipitado formado, conforme afirmam Moruzzi e Reali (2012).

## 3.7 EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO SIMPLES COM ANTRACITO

Posteriormente, a eficiência da filtração simples foi avaliada utilizando o antracito como meio filtrante, de granulometria entre 0,9 e 1,0 mm, sendo realizadas três carreiras de filtração com durações de 6, 8, 10 horas, respectivamente.

Segundo Wichtmann *et al*. (2019), o antracito é amplamente utilizado em sistemas de filtração de água devido à sua elevada porosidade, que favorece o fluxo hidráulico e reduz as perdas de carga no leito filtrante. Além disso, sua superfície irregular e angular proporciona maior área de contato com a água, otimizando a retenção de partículas suspensas e contaminantes.

A Tabela 6 sintetiza os resultados das análises físico-químicas realizadas nas amostras de água coletadas, abrangendo os parâmetros de turbidez, cor, ferro, pH e temperatura, avaliados nas condições de água bruta e tratada.

**Tabela 6**

*Resultados da filtração simples com areia*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 15,4 | 16,7 | 15,8 | 16,5 | 15,6 | 16,7 | 14,9 | 15,2 | 16,6 | 17,9 | 15,8 | 15,9 | 16,8 | 17,2 | 16,3 |
| | Cor (UC) | 18,2 | 21,7 | 21,4 | 19,5 | 20,8 | 18,1 | 20,2 | 16,3 | 19,4 | 19,2 | 21,4 | 19,9 | 20,6 | 20,2 | 21,4 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | pH | 7,35 | 7,35 | 7,32 | 7,35 | 7,39 | 7,38 | 7,36 | 7,35 | 7,35 | 7,38 | 7,36 | 7,35 | 7,36 | 7,34 | 7,34 |
| | Temp. (°C) | 27,4 | 27,6 | 28,4 | 28,8 | 26,9 | 28,2 | 29,2 | 30,3 | 29,8 | 27,9 | 28,1 | 29,4 | 29,9 | 30,2 | 29,8 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0,68 | 1,08 | 1,14 | 1,26 | 0,98 | 1,03 | 1,17 | 1,19 | 1,24 | 1,62 | 1,54 | 1,48 | 1,77 | 1,72 | 1,68 |
| | Cor (UC) | 4,7 | 4,6 | 5,2 | 5,8 | 5,2 | 4,3 | 4,6 | 5,4 | 5,8 | 5,6 | 4,8 | 4,2 | 5,4 | 6,2 | 5,79 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,77 | 7,69 | 7,75 | 7,76 | 7,77 | 7,73 | 7,82 | 7,86 | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,78 |
| | Temp. (°C) | 27,7 | 27,9 | 28,5 | 28,7 | 26,7 | 27,9 | 29,2 | 29,5 | 30,2 | 27,6 | 27,9 | 29,1 | 29,6 | 29,7 | 29,2 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 7, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância de turbidez, cor, ferro, temperatura e pH, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

No que se refere aos resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram, na maioria dos casos, valores de turbidez acima do padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888. O menor valor registrado foi de 14,9 uT, observado após 4 horas do início da operação da carreira de filtração 2, enquanto o maior valor foi de 17,9 uT, identificado após 4 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0,68 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 1. O maior valor foi de 1,77 verificado na carreira de filtração 3, após 6 horas de operação. Apesar da redução nos níveis de turbidez após o tratamento, os valores observados ainda ultrapassaram os limites de potabilidade estabelecidos para sistemas com filtração rápida.

As análises referentes ao parâmetro de cor indicaram valores acima do limite de potabilidade de 15 uH, conforme estabelecido pela portaria vigente para água bruta. Por outro lado, após a passagem pelo sistema de filtração, a água atendeu aos requisitos da portaria.

**Tabela 7**

*Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Antracito.*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 15,4 | 16,7 | 16,1 | 0,61 | 0,37 | 14,9 | 16,7 | 15,8 | 0,82 | 0,67 | 15,8 | 17,9 | 16,7 | 0,81 | 0,66 |
| | Cor (UC) | 18,2 | 21,7 | 20,2 | 1,65 | 2,73 | 16,3 | 20,8 | 19 | 1,8 | 3,23 | 19,2 | 21,4 | 20,5 | 0,87 | 0,75 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | pH | 7,32 | 7,35 | 7,34 | 0,01 | 0 | 7,35 | 7,39 | 7,37 | 0,02 | 0 | 7,34 | 7,38 | 7,36 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 27,4 | 28,8 | 28,1 | 0,66 | 0,44 | 26,9 | 30,3 | 28,9 | 1,36 | 1,84 | 27,9 | 30,2 | 29,2 | 0,98 | 0,96 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0,68 | 1,26 | 1,04 | 0,25 | 0,06 | 0,98 | 1,24 | 1,12 | 0,11 | 0,01 | 1,48 | 1,77 | 1,64 | 0,11 | 0,01 |
| | Cor (UC) | 4,6 | 5,8 | 5,08 | 0,55 | 0,3 | 4,3 | 5,8 | 5,06 | 0,61 | 0,37 | 4,2 | 6,2 | 5,33 | 0,72 | 0,52 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 7,76 | 7,78 | 7,77 | 0,01 | 0 | 7,69 | 7,77 | 7,74 | 0,03 | 0 | 7,76 | 7,86 | 7,8 | 0,04 | 0 |
| | Temp. (°C) | 27,7 | 28,7 | 28,2 | 0,48 | 0,23 | 26,7 | 30,2 | 28,7 | 1,39 | 1,95 | 27,6 | 29,7 | 28,9 | 0,89 | 0,79 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |

Fonte: Autoria (2025).

Assim, o menor valor registrado na água bruta foi de 16,3 uH, observado após 6 horas de operação da carreira 2, enquanto o maior valor, de 21,7 uH identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira 1. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 4,2 uH, observado após 4 horas da carreira 3. O maior valor foi de 6,2 uH verificado nas carreiras de filtração 3, após 8 horas.

Em relação a determinação dos parâmetros de pH e temperatura não apresentou grandes variações entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,32 a 7,39 entre as três carreiras de filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,69 e 7,86, mantendo-se dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 888. Já a temperatura variou de 26,9°C a 30,3°C na água bruta e de 26,7°C a 30,2°C na água tratada.

Referente ao parâmetro ferro, este apresentou eficiência de 100% nas carreiras 1, 2 e 3 após a passagem pelo sistema de filtração ao longo da operação do sistema.

## 3.8 EFICIÊNCIA DA FILTRAÇÃO SIMPLES COM ZEÓLITA

Por fim, a eficiência da filtração simples foi avaliada utilizando a zeólita (OXTECH-ZT) como meio filtrante, com granulometria classificada entre 0,4 e 1,2 mm, sendo realizadas três carreiras de filtração com durações de 6, 8 e 10 horas, respectivamente.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados das análises das amostras de água obtidas após cada coleta, considerando os parâmetros de turbidez, cor, teor de ferro, pH e temperatura, analisados em ambas as condições: água bruta e água tratada.

**Tabela 8**

*Resultados da filtração simples com zeólita.*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 13,9 | 14,1 | 14,4 | 13,8 | 16,2 | 15,8 | 15,7 | 16,6 | 14,9 | 17,2 | 17,8 | 16,9 | 17,3 | 16,2 | 16,5 |
| | Cor (UC) | 19,8 | 20,3 | 19,5 | 19,8 | 21 | 22,1 | 19,8 | 22,9 | 20,4 | 19,8 | 17,7 | 18,3 | 19,6 | 20,1 | 19,7 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | pH | 7,36 | 7,36 | 7,32 | 7,34 | 7,4 | 7,38 | 7,36 | 7,36 | 7,38 | 7,38 | 7,38 | 7,35 | 7,36 | 7,36 | 7,34 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 28,3 | 29,2 | 29,7 | 27,8 | 28,2 | 29,2 | 29,8 | 30,1 | 27,6 | 28,5 | 29,3 | 29,8 | 30,2 | 29,8 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | | |
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0 | 0,02 | 0 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,07 | 0,06 | 0,07 | 0,02 | 0,04 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 0,05 |
| | Cor (UC) | 0,68 | 1 | 1,04 | 1,2 | 1,15 | 1,06 | 1,32 | 1,23 | 1,18 | 0,94 | 1,3 | 1,28 | 1,32 | 1,24 | 1,36 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 8,18 | 8,1 | 7,98 | 7,87 | 8,69 | 7,9 | 7,76 | 7,77 | 7,73 | 8,32 | 7,96 | 7,78 | 7,76 | 7,78 | 7,78 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 28,3 | 28,7 | 29,2 | 26,9 | 27,5 | 29,4 | 29,8 | 30,2 | 27,4 | 27,9 | 29,3 | 29,8 | 29,9 | 30,2 |
| | Duração (h) | 6 | | | | 8 | | | | | 10 | | | | | |

Fonte: Autoria (2025).

Na Tabela 9, são apresentados os valores mínimo, máximo, médio, desvio padrão e variância de turbidez, cor, ferro, temperatura e pH, verificados tanto na água bruta quanto na água tratada.

Os resultados das análises da água bruta realizadas nas três carreiras de filtração indicaram, valores de turbidez acima do padrão de potabilidade estabelecido na Portaria nº 888. O menor valor registrado foi de 13,8 uT, observado após horas do início da operação da carreira de filtração 1, enquanto o maior valor foi de 17,8 uT, identificado após 2 horas de funcionamento do filtro na carreira de filtração 3. Em relação à água tratada, o valor mínimo

encontrado foi de 0 uT, observado nos primeiros 30 minutos da carreira de filtração 1. O maior valor foi de 0,07 verificado nas carreiras de filtração 2 e 3, após 8 e 6 horas, respectivamente. Portanto, a zeólita, utilizada como meio filtrante, promoveu a redução dos níveis de turbidez na etapa de pós-filtração rápida, atendendo aos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

**Tabela 9**

*Resultados da Filtração Simples utilizando Meio Filtrante de Zeólita.*

| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Bruta | Turbidez (UT) | 13,8 | 14,4 | 14,1 | 0,26 | 0,07 | 14,9 | 16,6 | 15,8 | 0,63 | 0,4 | 16,2 | 17,8 | 16,98 | 0,58 | 0,33 |
| | Cor (UC) | 19,5 | 20,3 | 19,9 | 0,33 | 0,11 | 19,8 | 22,9 | 21,2 | 1,26 | 1,58 | 17,7 | 20,1 | 19,2 | 0,96 | 0,93 |
| | Ferro (mg/L) | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 | 5 | 5 | 0 | 0 |
| | pH | 7,32 | 7,36 | 7,35 | 0,02 | 0 | 7,36 | 7,4 | 7,38 | 0,02 | 0 | 7,34 | 7,38 | 7,36 | 0,02 | 0 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 29,7 | 28,7 | 0,93 | 0,87 | 27,8 | 30,1 | 29 | 1 | 0,99 | 27,6 | 30,2 | 29,2 | 0,98 | 0,96 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |
| | Parâmetro | Carreira 1 | | | | | Carreira 2 | | | | | Carreira 3 | | | | |
| | | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var | Mím | Máx | Md | Des | Var |
| Água Tratada | Turbidez (UT) | 0 | 0,04 | 0,02 | 0,02 | 0 | 0,03 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0 | 0,02 | 0,07 | 0,05 | 0,02 | 0 |
| | Cor (UC) | 0,68 | 1,2 | 0,98 | 0,22 | 0,05 | 1,06 | 1,32 | 1,19 | 0,1 | 0,01 | 0,94 | 1,36 | 1,24 | 0,15 | 0,02 |
| | Ferro (mg/L) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | pH | 7,87 | 8,18 | 8,03 | 0,14 | 0,02 | 7,73 | 8,69 | 7,97 | 0,41 | 0,17 | 7,76 | 8,32 | 7,9 | 0,22 | 0,05 |
| | Temp. (°C) | 27,6 | 29,2 | 28,5 | 0,68 | 0,46 | 26,9 | 30,2 | 28,8 | 1,47 | 2,15 | 27,4 | 30,2 | 29,08 | 1,16 | 1,34 |
| | Duração (h) | | | 6 | | | | | 8 | | | | | 10 | | |

Fonte: Autoria (2025).

Do mesmo modo, as análises do parâmetro cor revelaram valores acima do limite de potabilidade de 15 uH, definido pela portaria vigente para água bruta. Após passar pelo filtro, a água atendeu aos requisitos da portaria.

Assim, o menor valor registrado na água bruta foi de 17,7 uH, observado após 2 horas de operação da carreira 3, enquanto o maior valor, de 22,4 uH identificado após 6 horas de funcionamento do filtro na carreira 2. Em relação à água tratada, o valor mínimo encontrado foi de 0,68 uH, observado após 30 minutos da carreira 4. O maior valor foi de 1,36 uH verificado na carreira 3, após 10 horas de operação, resultados os quais atendem aos limites de potabilidade estabelecidos pela Portaria.

Em relação a determinação dos parâmetros de pH apresentou variações entre as análises da água bruta e tratada. O pH da água bruta variou de 7,32 a 7,40 entre as três carreiras de

filtração, enquanto na água tratada os valores oscilaram entre 7,73 e 8,69. É possível verificar que a zeólita influencia a alcalinidade da água, tornando-a ligeiramente mais básica. Apesar disso o pH se mantém dentro dos limites estabelecidos pela Portaria 888. Já a temperatura variou de 27,6°C a 30,2°C na água bruta e de 26,9°C a 30,2°C na água tratada. Em relação ao parâmetro ferro, este obteve eficiência de 100% ao longo das carreiras 1, 2 e 3 após a passar pelo sistema de filtração.

Dessa forma, a zeólita foi o meio filtrante que apresentou os melhores resultados em conformidade com os VPM estabelecidos pela Portaria n° 888/2021. Trata-se de um material adsorvente muito utilizado como meio filtrante na retirada de íons metálicos para a tratamento de água, uma vez que tem a habilidade de troca iônica com a água, favorecendo a retenção de metais pesados como íons de ferro, uma vez que a estrutura porosa das zeólitas permite uma alta capacidade de adsorção, capturando eficientemente íons metálicos e outros contaminantes (Vistuba, 2010; Paz, 2016; Mubarak *et al*., 2021).

## 3.9 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS DIFERENTES MEIOS FILTRANTES

Na Tabela 10, é apresento a eficiência dos diferentes meios filtrantes na remoção de turbidez, cor e ferro, avaliados 30 minutos após o início da operação do filtro e a cada 2 horas durante a filtração.

Na filtração simples com areia, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 82,41% (após 2h da carreira 1) e 85,96% (após 30 min da carreira 3). Quanto à cor, os valores oscilaram entre 20,23% (6 h, carreira 3) e 56,56% (10 h, carreira 3). Já para o ferro, a eficiência mínima foi de 0% (10 h, carreira 3) e a máxima de 92,20% (6 h, carreira 3). A redução na remoção de ferro ao longo do tempo indica saturação do meio filtrante, evidenciando a necessidade de retrolavagem periódica.

Na etapa de filtração simples com antracito, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 89,46% (6h, carreira 3) e 95,58% (30 min, carreira 1). Para a cor, os valores oscilaram de 66,87% (8h, carreira 2) a 78,89% (4h, carreira 3). Na remoção de ferro, a eficiência foi de 100% em ambas as carreiras.

Na etapa de filtração simples com zeólita, a eficiência na remoção de turbidez variou entre 99,53% (8h, carreira 2) e 100% (30 min e 6 h, carreira 1). Para a cor, os valores oscilaram de 92,65% (2h, carreira 3) a 96,56% (30 min, carreira 1). Na remoção de ferro, a eficiência foi de 100% em ambas as carreiras.

**Tabela 10**

*Resultados da da Eficiência dos Diferentes Meios Filtrantes.*

| Parâmetro | Carreiras de Filtração (Ef %) | Filtração Simples + Areia | | | | | | Filtração Simples + Antracito | | | | | | Filtração Simples + Zeólita | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h | 30 min | 2 h | 4 h | 6 h | 8 h | 10 h |
| Turbidez | Carreira 1 | 83,55 | 82,41 | 82,75 | 82,89 | - | - | 95,58 | 93,53 | 92,78 | 92,36 | - | - | 100 | 99,85 | 100 | 99,71 | - | - |
| | Carreira 2 | 85,18 | 84,51 | 85,3 | 85,08 | 84,08 | - | 93,71 | 93,83 | 92,14 | 92,17 | 92,53 | - | 99,81 | 99,81 | 99,55 | 99,63 | 99,53 | - |
| | Carreira 3 | 85,96 | 84,72 | 85,16 | 85,46 | 85,39 | 85,59 | 90,94 | 90,25 | 90,69 | 89,46 | 90 | 89,69 | 99,88 | 99,77 | 99,76 | 99,59 | 99,69 | 99,69 |
| Cor | Carreira 1 | 39,42 | 20,33 | 31,38 | 29,27 | - | - | 74,17 | 78,8 | 75,7 | 70,25 | - | - | 96,56 | 95,07 | 94,66 | 93,93 | - | - |
| | Carreira 2 | 43,09 | 47,39 | 40,42 | 42 | 40,1 | - | 75 | 76,24 | 77,22 | 66,87 | 70,1 | - | 94,52 | 95,2 | 93,33 | 94,62 | 94,21 | - |
| | Carreira 3 | 31,16 | 43,25 | 30,12 | 20,23 | 44,04 | 56,56 | 70,83 | 77,57 | 78,89 | 73,78 | 69,3 | 72,94 | 95,25 | 92,65 | 93 | 93,26 | 93,83 | 93,09 |
| Ferro | Carreira 1 | 80,8 | 62 | 70,6 | 70 | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - | 100 | 100 | 100 | 100 | - | - |
| | Carreira 2 | 87 | 74,6 | 77,6 | 83,8 | 22,6 | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - |
| | Carreira 3 | 84 | 84 | 89,4 | 92,2 | 13,4 | 0 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

Fonte: Autoria (2025).

## 4 CONCLUSÃO

A análise comparativa dos métodos de tratamento da água: filtração simples com areia, filtração simples com antracito e filtração simples com zeólita pode-se observar diferenças relevantes na eficiência de remoção de cor, turbidez e ferro.

Na remoção de turbidez, a areia apresentou o menor desempenho entre os meios filtrantes testados. Na filtração simples, obteve eficiências entre 82,41% e 85,96%, com turbidez da água tratada variando de 2,72 uT a 2,19 uT. O antracito mostrou desempenho superior, com remoção de turbidez entre 89,46% e 95,58%, em que os valores de turbidez na água tratada variou de 1,77 uT a 0,68 uT. A zeólita apresentou os melhores resultados, com remoções de 99,68% a 99,85%, apresentando turbidez residual entre 0,00 uT e 0,07 uT. Desta forma, considerando que a Portaria nº 888 estabelece, para sistemas de abastecimento com filtração rápida, o limite máximo de 0,5 uT em 95% das amostras mensais, observa-se que apenas a zeólita atendeu ao padrão de potabilidades de remoção de turbidez.

Nos ensaios de remoção de cor aparente, os meios filtrantes apresentaram eficiências distintas. A areia teve o menor desempenho: na filtração simples, as remoções variaram de 20,23% a 56,56%, com cor residual entre 18,8 uH e 10,1 uH. O antracito demonstrou maior eficiência que a areia, com remoções de 66,87% a 78,89% e cor residual entre 6,2 uH e 4,3 uH. A zeólita novamente apresentou os melhores resultados, com remoção de cor entre 92,65% e 96,56%, e valores finais de cor entre 1,36 uH e 0,68 uH. De acordo com a Portaria nº 888/2021, que estabelece limite máximo de 15 uH para cor aparente em água destinada ao consumo humano, apenas os sistemas com filtração simples utilizando antracito e zeólita atenderam aos padrões de qualidade para esse parâmetro.

Na remoção de ferro, os métodos de tratamento apresentaram diferenças significativas de desempenho. A filtração simples com areia obteve as menores eficiências, com remoções variando de 0% a 92,2%, e concentrações residuais de ferro entre 5,0 mg/L e 0,39 mg/L, evidenciando baixa capacidade de retenção e alta variação ao longo das carreiras de filtração. Já a filtração simples com antracito e zeólita obteve 100% de remoção de ferro em todas as carreiras, demonstrando desempenho superior e estabilidade no tratamento.

Assim, considerando o limite máximo de 0,3 mg/L de ferro estabelecido pela Portaria nº 888, conclui-se que, nas condições avaliadas neste estudo, a filtração simples com areia não foi eficaz na remoção do ferro. Por outro lado, a aplicação de filtração simples com antracito ou zeólita, demonstraram ser capazes de atender aos parâmetros estabelecidos pela legislação.

No que diz respeito ao pH, observou-se que a zeólita alterou o pH da água, tornando-a ligeiramente mais básica, com valores variando entre 7,73 e 8,69. Em contrapartida, os demais métodos mantiveram o pH próximo ao da água bruta. Assim, em todos os ensaios o pH apresentou variações dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

No entanto, considerando os limites máximos permitidos para os parâmetros cor, turbidez e ferro estabelecidos pela Portaria 888, para as condições deste estudo, foi verificado que a filtração com antracito, embora tenha apresentado bons resultados para a remoção de ferro e cor, não foi eficiente para a remoção de turbidez. Já a filtração simples com areia, apesar de apresentar melhorias nos parâmetros analisados, não se mostrou eficiente para produção de água tratada condizente para nem um dos parâmetros, conforme determina a legislação vigente.

Já a aplicação da filtração simples com zeólita, considerando as características da água bruta deste estudo, demonstrou ser um método eficiente na remoção de turbidez e cor, produzindo água com valores muito abaixo dos valores máximos determinados pela Legislação vigente, além de permitir a remoção completa do ferro, representando, assim, uma alternativa eficaz para o tratamento de água, considerando os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 888.

Além disso, considerando que, em nenhuma das carreiras de filtração, foi atingida a perda de carga total de 1,0 m para nenhum dos meios filtrantes, torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos que acompanhem a carreira de filtração até o limite máximo de perda de carga. Isso permitirá investigar o transpasse de cor, turbidez e ferro, bem como definir com maior precisão o tempo total da carreira de filtração e, consequentemente, estabelecer parâmetros adequados para a limpeza do filtro, como o tempo de retrolavagem e o volume de água consumido.

Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de estudos envolvendo filtros de camada dupla, com diferentes combinações de meios filtrantes aplicando areia, antracito e zeólita com o objetivo de avaliar a otimização da remoção de impurezas, e o desenvolvimento de tecnologias mais eficazes no tratamento de água, bem como investigar a aplicação da oxidação com cloro antes da filtração, a fim de facilitar a remoção de impurezas, sobretudo o ferro, nos processos de tratamento.

Assim, diante da crescente demanda por soluções sustentáveis e inclusivas no setor de saneamento, destaca-se a importância de fomentar pesquisas voltadas ao desenvolvimento de sistemas simplificados de tratamento de água, com o objetivo de incentivar e fortalecer alternativas coletivas e acessíveis, capazes de ampliar o acesso à água potável em comunidades vulneráveis.

Nesse contexto, torna-se imprescindível a definição de critérios e diretrizes para o monitoramento, operação e manutenção desses sistemas, assegurando sua efetividade e sustentabilidade. Tais medidas mostram-se particularmente relevantes em áreas rurais, comunidades indígenas e ribeirinhas, territórios que, em sua maioria, enfrentam dificuldades de acesso aos sistemas convencionais de abastecimento de água.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio financeiro da Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas (FAPESPA) pelo financiamento que contribuiu para o desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

Almeida, M. C., Silva, M. M., & Paula, M. (2017). Avaliação do desempenho de uma estação de tratamento de água em relação à turbidez, cor e pH da água. Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA), 5(1), 25–40.

Almeida, F. C. P., Menezes, M. A., & Facó, J. F. B. (2020). Desafios na gestão das águas: percepção dos gestores de uma indústria automotiva da Macrometrópole Paulista. Research, Society and Development, 9(2), e02921920. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i2.1920

Agência Nacional de Águas [ANA]. (2014). Mapa de áreas de afloramento dos aquíferos do Brasil: Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos. https://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/index.php/estantes/mapas/2845-mapa-de-areas-de-afloramento-dos-aquiferos-do-brasil

American Public Health Association [APHA]. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.). Washington, DC: APHA.

Araújo, D. L., & Andrade, R. F. (2020). Qualidade físico-química e microbiológica da água utilizada em bebedouros de instituições de ensino no Brasil: Revisão sistemática da literatura. Brazilian Journal of Health Review, 3(4), 7301–7324. https://doi.org/10.34119/bjhrv3n4-240

Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT]. (1992). NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. ABNT.

Barco, B. A. P. (2017). Estudo da contaminação por ferro de águas subterrâneas provenientes da região noroeste do estado do Paraná [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. Repositório Institucional UTFPR. https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6146/1/contaminacaoferroaguassubterraneas.pdf

Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. (2017). Manual da solução

alternativa coletiva simplificada de tratamento de água para consumo humano em pequenas comunidades utilizando filtro e dosador desenvolvidos pela Funasa/Superintendência Estadual do Pará. Funasa.

Brasil. Ministério da Saúde. (2021, 4 de maio). Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Diário Oficial da União, Edição 85, Seção 1, p. 127. https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562

Chaves, S. C. S., Carvalho, V. S., Barbosa, I. M. B. R., & Ferreira, A. A. (2022). Caracterização hidroquímica de águas subterrâneas da Região Metropolitana do Recife – PE. Diversitas Journal, 7(4), 2391–2398. https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v7i4-2166

Chaysiri, R., Chinviriyasit, W., & Louis, G. E. (2024). Optimal control strategies for water, sanitation, and hygiene in mitigating spread of waterborne diseases. Journal of Process Control, 133, 103132. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103132

Cid-Escobar, D., Folch, A., Ferrer, N., Katuva, J., & Sanchez-Vila, X. (2024). An assessment tool to improve rural groundwater access: Integrating hydrogeological modelling with socio-technical factors. Science of the Total Environment, 912, 168864. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168864.

Corrêa, M. M., Ker, J. C., Barrón, V., Torrent, J., Fontes, M. P. F., & Curi, N. (2008). Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32, 1857–1872. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500018

Fernandez, L. L., Fornari, L. H. T., Barbosa, M. V., & Schroder, N. (2007). Ferro e neurodegeneração. Scientia Medica, 17(4), 218–224.

García-Ávila, F., Criollo-Illescas, F., Zhindón-Arévalo, C., García-Uzca, C., Donoso-Moscoso, S., & Alfaro-Paredes, E. (2024). Integration of rapid filters for the provision of drinking water at rural home level. Groundwater for Sustainable Development, 26, 100–118. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100946

Hossain, M. A., Haque, M. I., Parvin, M. A., & Islam, M. N. (2023). Evaluation of iron contamination in groundwater with its associated health risk and potentially suitable depth analysis in Kushtia Sadar Upazila of Bangladesh. Groundwater for Sustainable Development, 21, 100946. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100946

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada [IPEA]. (2019). Objetivos de desenvolvimento sustentável: ODS 6. https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html

Lima, V. C., Lima, M. R., & Melo, V. F. (2007). O solo no meio ambiente: Abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. Universidade Federal do Paraná. http://www.gestaoescolar.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/solo_escola/solo_meio_ambiente.pdf

Michelan, D. C. G. S., Sens, M. L., & Dalsasso, R. L. (2015). Comparação da duração da carreira de filtração entre filtro lento com limpeza convencional e retrolavável. Scientia Plena, 11, 113303. https://doi.org/10.14808/sci.plena.2015.113303

Mubarak, M. F., Oliveira, A. M. G., Keshawy, M., Oliveira, T. A., & Shehata, N. (2021). Adsorção de metais pesados e íons de dureza de águas subterrâneas em zeólita modificada: Estudos em batelada e coluna. Alexandria Engineering Journal, 61(6), 4823–4834. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.027

Moruzzi, R. B., & Reali, M. A. P. (2012). Oxidação e remoção de ferro e manganês em águas para fins de abastecimento público ou industrial – uma abordagem geral. Revista de Engenharia e Tecnologia, 4(1), 1–12.

Paz, E. C. (2016). Análise da eficiência de remoção de ferro e manganês de águas de abastecimento por filtração adsortiva [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Ponta Grossa].

Poliakov, V. L., & Martynov, S. Y. (2023). Technological modeling of physicochemical removal of iron from deep groundwater. Heliyon, 9(5), e20202. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20202

Quansah, J. O., Obiri-Nyarko, F., & Karikari, A. Y. (2024). Adsorptive removal of dissolved iron from groundwater by brown coal – A low-cost adsorbent. Journal of Contaminant Hydrology, 260, 104283. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2023.104283

SIAGAS. (2003). Sistema de Informações de Águas Subterrâneas: Ficha técnica completa de poço. Serviço Geológico do Brasil (CPRM). http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pdf/exportar_pdf.php?ponto=1500003355

Silva, F. C., Moraes, V. M. C., Coutinho, E. C., Ribeiro, H. M. C., Chaves, A. F. F., Barbosa, A. J. S. S., & Gutierrez, L. A. C. L. (2023). Tecnologias de remoção de ferro em águas subterrâneas: Uma revisão sistemática. Peer Review, 5(26), 104–118.

Silva, R. O., & Silva, A. B. (2021). Diagnóstico do sistema de abastecimento de água em zona urbana sob a percepção do usuário no município de Tucuruí-PA. Revista de Ciência e Tecnologia, 7, 1–15.

Soares, I. S., Costa, M. S. B., Gomes, M. A., Freitas, A. A., & Barros, A. J. (2021). Estudo da remoção e controle de ferro nas águas da nascente Serra do Andrade-MG. Research, Society and Development, 10(6), e59910615980. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i6.15980

Tavares, S. R. L. (2008). Curso de recuperação de áreas degradadas: A visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Embrapa Solos.

Thomaz, K. T. C., Queiroz, L. S., Faial, K. C. F., Zamian, J. R., Nascimento, L. A. S., Rocha Filho, G. N., Souza, L. K. C., & Costa, C. E. F. (2023). Removal of Fe and Mn ions from groundwater using activated carbon obtained from waste products of Brazil nut and andiroba cultivation in the Amazon region. Sustainable Materials and Technologies, 38, e00528. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00528

Vasquez, M. L., Sousa, C. S., & Carvalho, J. M. A. (Orgs.). (2008). Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Pará, escala 1:1.000.000. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/para.pdf

Viegas, C. J. T., Araújo, E. P., Sousa, T. S., Cunha, H. F. A., & Cunha, A. C. (2024). Variação geoespacial de indicadores de saneamento básico e de saúde dos ex-territórios federais na Amazônia. Revista Brasileira de Geografia Física, 17(2), 1038–1059. https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1038-1059

Vistuba, J. P. (2010). Remoção de ferro e manganês de água de abastecimento por meio de filtração adsortiva (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Von Sperling, M. (2005). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos (3a ed.). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais.

Wichtmann, T., Triantafyllidis, T., & Späth, L. (2019). On the influence of grain shape on the cumulative deformations in sand under drained high-cyclic loading. Soils and Foundations, 59(1), 9–20. https://doi.org/10.1016/j.sandf.2019.01.001.

Yan, C., Wan, W., Wang, R., Lai, T., Ali, W., He, S., Liu, S., Li, X., Nasir, Z. A., & Coulon, F. (2024). Quantitative health risk assessment of microbial hazards from water sources for community and self-supply drinking water systems. Journal of Hazardous Materials, 465, 133324. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133324.

Universidade do Estado do Pará
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia PPGTEC – Mestrado
Tv. Enéas Pinheiro, 2626, Marco, Belém-PA, CEP: 66095-100
http://ccnt.uepa.br/ppgtec/